

IB 552/78-6

Untersuchungen zu einem aktiven Schwingungs-
isolationssystem für Hubschrauber bei starrer
und elastischer Zellenmodellierung

J. Skudridakis

Freigabe:

Die Bearbeiter:

Dipl.-Ing. J. Skudridakis
abgestellt vom Institut
für Flugmechanik
Braunschweig

Unterschriften:

Skudridakis Jean

Der Abteilungsleiter:

G. Gübel

Der stellv. Institutsdirektor:

Der Institutsdirektor:

J. Ackermann

Dieser Bericht enthält:

72 Blatt davon

31 Bilder

 Diagramme

--

Ort: Oberpfaffenhofen

Datum: 23. Juni 78

Bearbeiter:
J. Skudridakis

Zeichen: Sk/Hie

Untersuchungen zu einem aktiven Schwingungsisolationsystem für Hubschrauber bei starrer und elastischer Zellenmodellierung.

Übersicht

In diesem Bericht wurde ein System zur aktiven Rotor-Isolation untersucht.

Aufgrund des gezielten Reglerentwurfs leistet dieses System folgende zwei Aufgaben:

- Kompensation blattzahlharmonischer Rotorerregung und
- Begrenzung der statischen Relativbewegung der Rotorgetriebe-Einheit.

Für die zunächst durchgeführte Reglerauslegung für ein einachsiges starres Funktionsmodell mit einem modifizierten Riccati-Entwurf wurden verschiedene Sensorkonfigurationen untersucht.

Eine Erweiterung dieses einachsigen Rechenmodells für die elastische Hubschrauber-Zellenmodellierung wurde (mittels eines modifizierten Riccati-Entwurfs) durchgerechnet.

Die Rechenergebnisse zeigen, daß die aktive Rotor-Isolation allen bekannten passiven Rotor-Isolationssystemen vom Konzept her überlegen ist.

Die für das einachsige Rechenmodell entworfenen Regler zeigen eine sehr gute Isolation der Vibrationen bei der 4- und 8-fachen Rotordrehfrequenz in Verbindung mit einem raschen Einschwingen.

Außerdem wurde bei Zusatzlastvielfachen der Abstand zwischen Rotor-Getriebe-Einheit und Zelle nachgetrimmt.

<u>Gliederung</u>	<u>Seite</u>
Übersicht	2
Bezeichnungen	4
Einleitung	6
1. Modellgleichung, Modelldaten und Entwurfskriterien	11
1.1 Rechenmodell für das 2-Massensystem mit und ohne Zellenelastizität	11
1.2 Modelldaten	13
1.3 Entwurfskriterien	18
2. Reglerentwurf für ein starres 2-Massensystem	20
2.1 Starres 2-Massensystem mit der Steuergröße $u = \bar{i}$	22
2.1.1 Reglerentwurf	23
2.2 Starres 2-Massensystem mit der Steuergröße $u = \bar{F}_I$...	33
2.2.1 Reglerentwurf	34
3. Reglerentwurf für ein 2-Massensystem mit elastischer Zelle	42
3.1 2-Massensystem mit elastischer Zelle und Steuergröße $u = \bar{i}$	42
3.1.1 Reglerentwurf bei Rückführung von Relativauslenkung $\Delta \bar{z}$ und Aktuatordruckdifferenz Δp	42
3.1.2 Reglerentwurf bei alleiniger $\Delta \bar{z}$ Rückführung	50
3.2 2-Massensystem, Zelle elastisch und Steuergröße $u = \bar{F}_I$	54
3.2.1 Reglerentwurf	54
4. Vergleich der Reglerentwürfe	61
5. Zusammenfassung	63
6. Schrifttum	64
Anhang	65

Bezeichnungen

Ω	Rotorkreisfrequenz (rd/s)
ψ	Rotordrehwinkel (rd) ; $\psi = \Omega \cdot t$
f_R	Rotorfrequenz (Hz)
k_R, k_Z, k_L, k_Δ	Federkonstanten
d_L, d_Δ	Dämpfungsbeiwerte
$\Delta z, (\bar{\Delta z})$	Relativauslenkung (normiert)
$Z_R, (\bar{Z}_R)$	Rotorauslenkung (normiert)
$Z_Z, (\bar{Z}_Z)$	Zellenauslenkung (normiert)
$\epsilon, (\bar{\epsilon})$	Ventilkolbenauslenkung (normiert)
$i, (\bar{i})$	Ventilsteuerstrom (normiert)
$F_R, (\bar{F}_R)$	Rotorstörkraft (normiert)
$m, (m_R, m_Z)$	Masse (Rotor, Zelle)
$G_{ges} = m \cdot g$	Gesamtgewicht (Rotor und Zelle)
\underline{x}_i	Zustandsvektor ($i = 0, 1, \dots, n$)
\underline{A}_i	Dynamikmatrizen der Zustandsmodelle
\underline{b}_i	Steuervektoren der Zustandsmodelle
\underline{b}_{v_i}	Störeingangsvektoren der Zustandsmodelle
δ_A	Maximalauslenkung des Aktuators
Δp_{max}	Maximale Druckdifferenz des Aktuators
$b_A, (\bar{b}_A)$	Aktuatoranschlußbeschleunigung (normiert)
$F_I, (\bar{F}_I)$	Isolatorkraft (normiert)
n_i, n_i'	Zustandselemente der Regler ($i = 0, 1, \dots, n$)
$F_A, (\bar{F}_A)$	Kolbenfläche des Aktuators (normiert)
\underline{Q}, R	Gewichtsmatrizen (für den Riccati-Entwurf)
J	Gütekriterium
\underline{r}	Rückführvektor
\underline{K}	Rückführmatrix

$\beta (\cdot)$	Dämpfungsgewinn
ω_{si}	Notchfrequenz
s	Laplace-Operator
\underline{X}_{Ni}	Zustandsvektor der Notch Elemente
\underline{B}	Eingangsmatrix der Notch Elemente
\underline{A}	Dynamikmatrix der Notch Elemente
\underline{Y}_{Ni}	Meßvektor der Notch Elemente
\underline{C}_i	Meßmatrix der Zustandsmodelle
$r_{\Delta z}, r_{\Delta p}, r_{n_4}, r_{n_4'}, r_{n_8}, r_{n_8'}, r_{n_0}$	Rückführkoeffizienten
\underline{N}_i	Dynamikmatrix der Notch Elemente
η_i	Generalisierte Koordinaten der Zellenmodalformen
$\underline{W}(s)$	Zählerpolynommatrix (Vektor)
$F(s)$	Nennerpolynom (offener Kreis)
$H(s)$	Nennerpolynom (geschlossener Kreis)
\underline{I}	Einheitsmatrix
\underline{q}	Komponentenmatrix der Rückführmatrix \underline{K}
T	Abtastperiode
t	Zeitvariable
ω	Frequenz (allgemein)

Differentiationssymbole

$\dot{} = \frac{d}{dt}$	Differentiation nach der Zeit t
$\dot{} = \frac{d}{d\psi}$	Differentiation nach dem Azimutwinkel ψ

Einleitung

Die Strömungsverhältnisse an einem Hubschrauberrotor führen durch die Überlagerung der Hubschrauberbewegung und der Rotordrehung im stationären Flug zu periodischen Kräften, die verschiedenartige Schwingungserscheinungen zur Folge haben.

Diese sind insbesondere, durch die dynamischen Eigenschaften des Rotorblattes, seine Massen- und Steifigkeitsmerkmale und die Blattanschlußbedingungen bestimmt.

Das rotierende Tragwerk des Hubschraubers, das die Fähigkeit, ohne Vorwärtsgeschwindigkeit in der Luft zu schweben bewirkt, ist die Ursache für nahezu alle Schwingungserscheinungen am Hubschrauber.

Der Zusammenwirkung von Rotor und Zelle kommt die größte Bedeutung bei der Betrachtung der Schwingungserscheinungen zu.

Die Übertragung der veränderten Rotorkräfte über die Rotorwelle auf die Zelle, bewirkt dort erzwungene Schwingungen, deren Schwingungsamplituden von der Lage der Schwingungsknoten der Zelleneigenschwingungen gegenüber demjenigen der Antriebseinheit, abhängen.

Die Frequenzen dieser Rotorstörerregungen sind die sogenannten blattzahlharmonischen Frequenzen ($N\Omega$, $2N\Omega$...), die über die Blattzahl N und die Rotorkreisfrequenz bestimmt sind.

Typische Amplitudenspektren dieser Frequenzen zeigt Bild 1 am Beispiel dreier Hubschrauber.

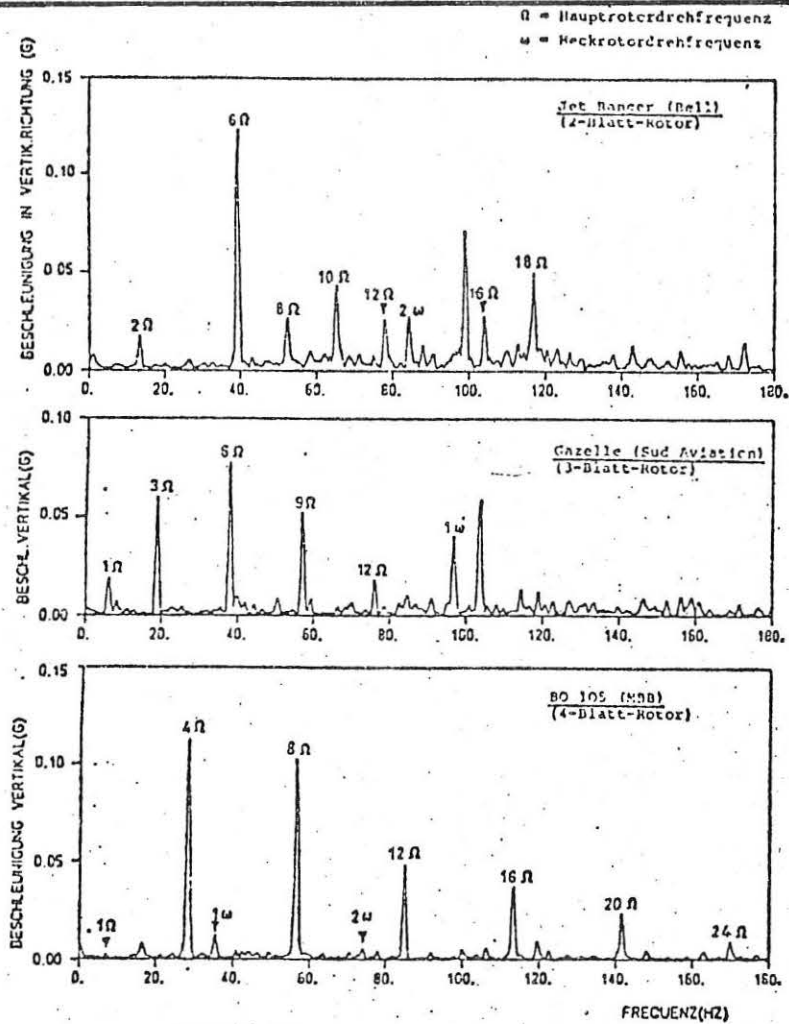
Diese Vibrationen bewirken neben den Auswirkungen auf die Struktur eine Beeinträchtigung des Insassen-Komforts. Es sind deshalb Betreibungen im Gange, die Beurteilungskriterien für Vibrationen bei zukünftigen Hubschraubern wesentlich zu verschärfen.

Es gibt eine Reihe von Möglichkeiten eine Vibrationsverringerung zu erzielen. z.B.:

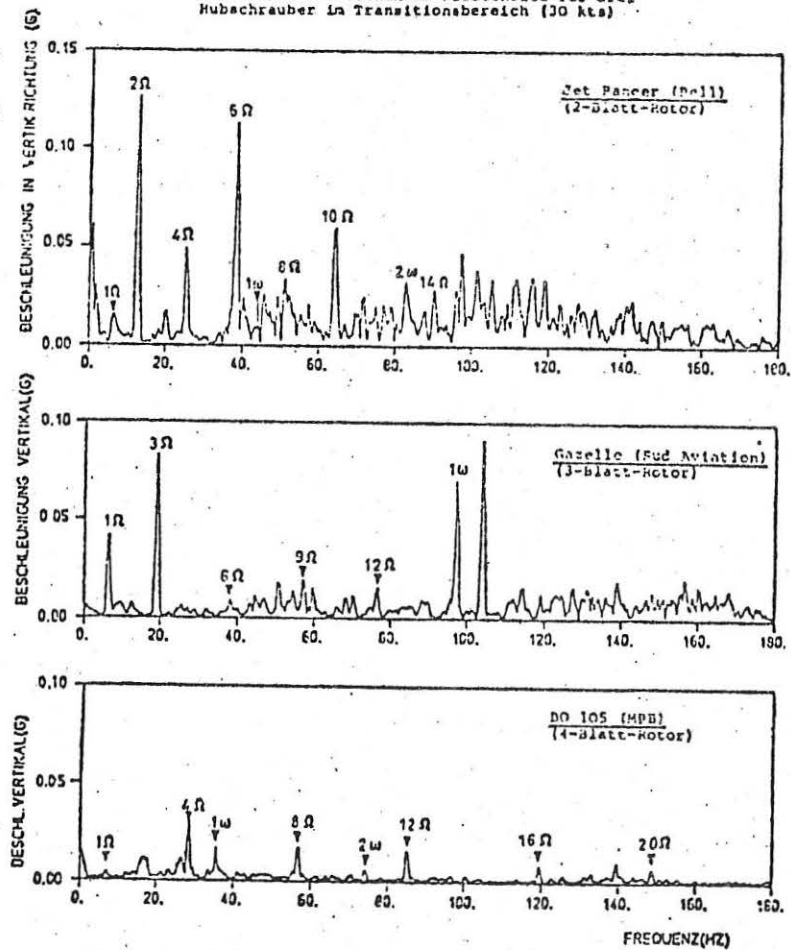
- Dynamische Optimierung von Rotor und Zelle
- Rotorblatt-Fliehkrafttilger
- Schwingungsisolierung der Zelle

(siehe dazu Bild 2)

Von den obengenannten Möglichkeiten zur Bekämpfung von Schwingungen am Hubschrauber, wird im Rahmen der ZKP-Aufgabe ASIS (Aktives Schwingungs-Isolations-System) die Schwingungsisolierung mittels regelbarer Stellglieder zwischen Rotorgetriebe-Einheit und Hubschrauberzelle untersucht.

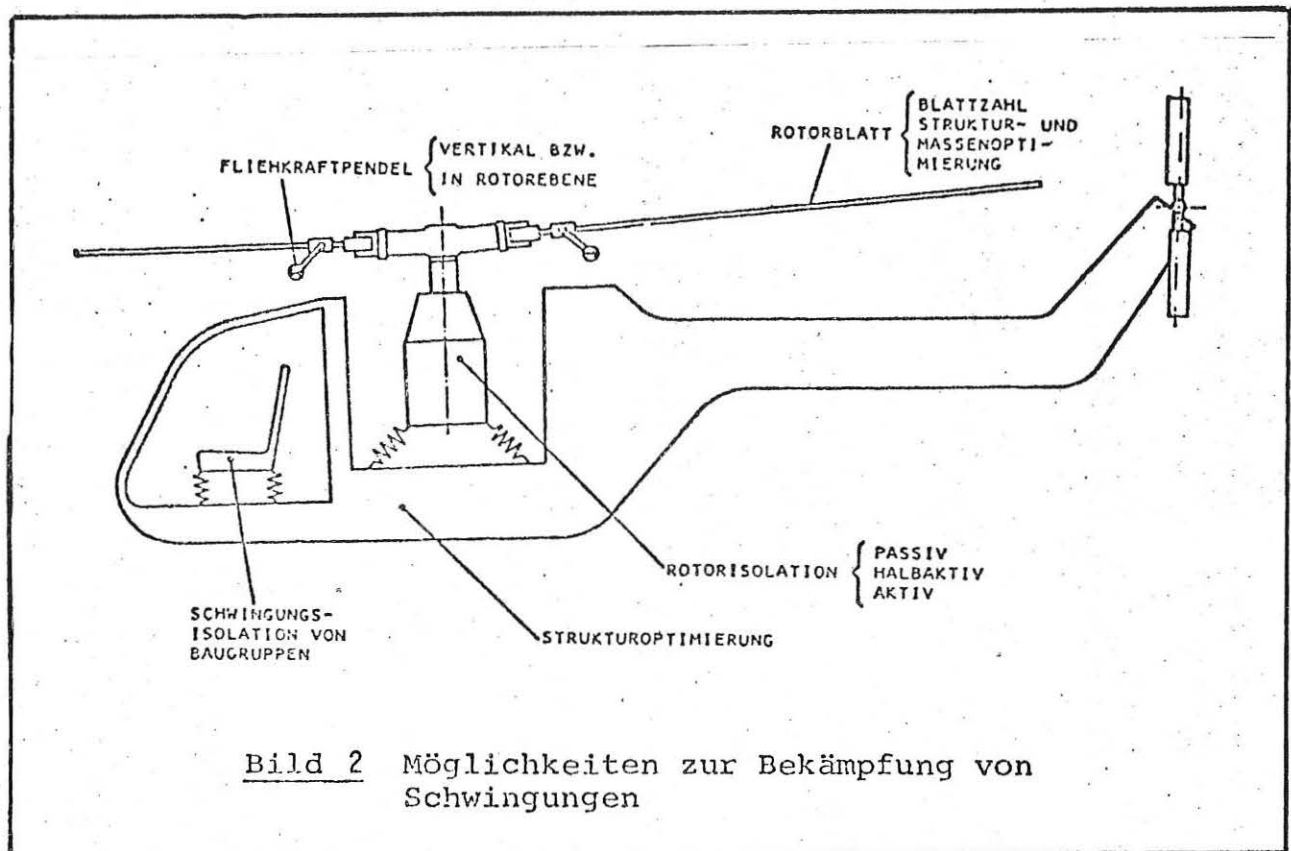


Vertikale Vibrationen am Pilotensitz für drei
 Hubschrauber im Transitionsbereich (30 kts)



Vertikale Vibrationen am Pilotensitz für drei
 Hubschrauber im Horizontalflug (100 kts)

Bild 1: Vertikale Vibrationen am Pilotensitz von Hubschraubern

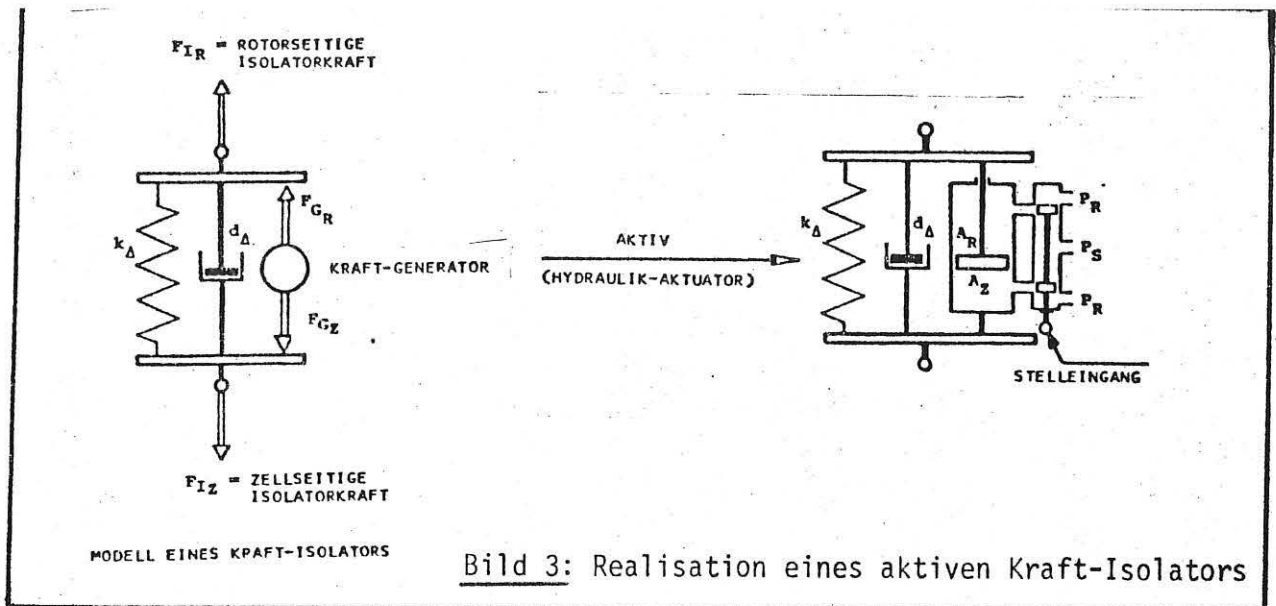


Ein entsprechender Regler soll über hydraulische Servo-Elemente die Rotor-Getriebe-Einheit von der Zelle trennen und im gesamten Einsatzprofil des Hubschraubers die folgenden Aufgaben erfüllen:

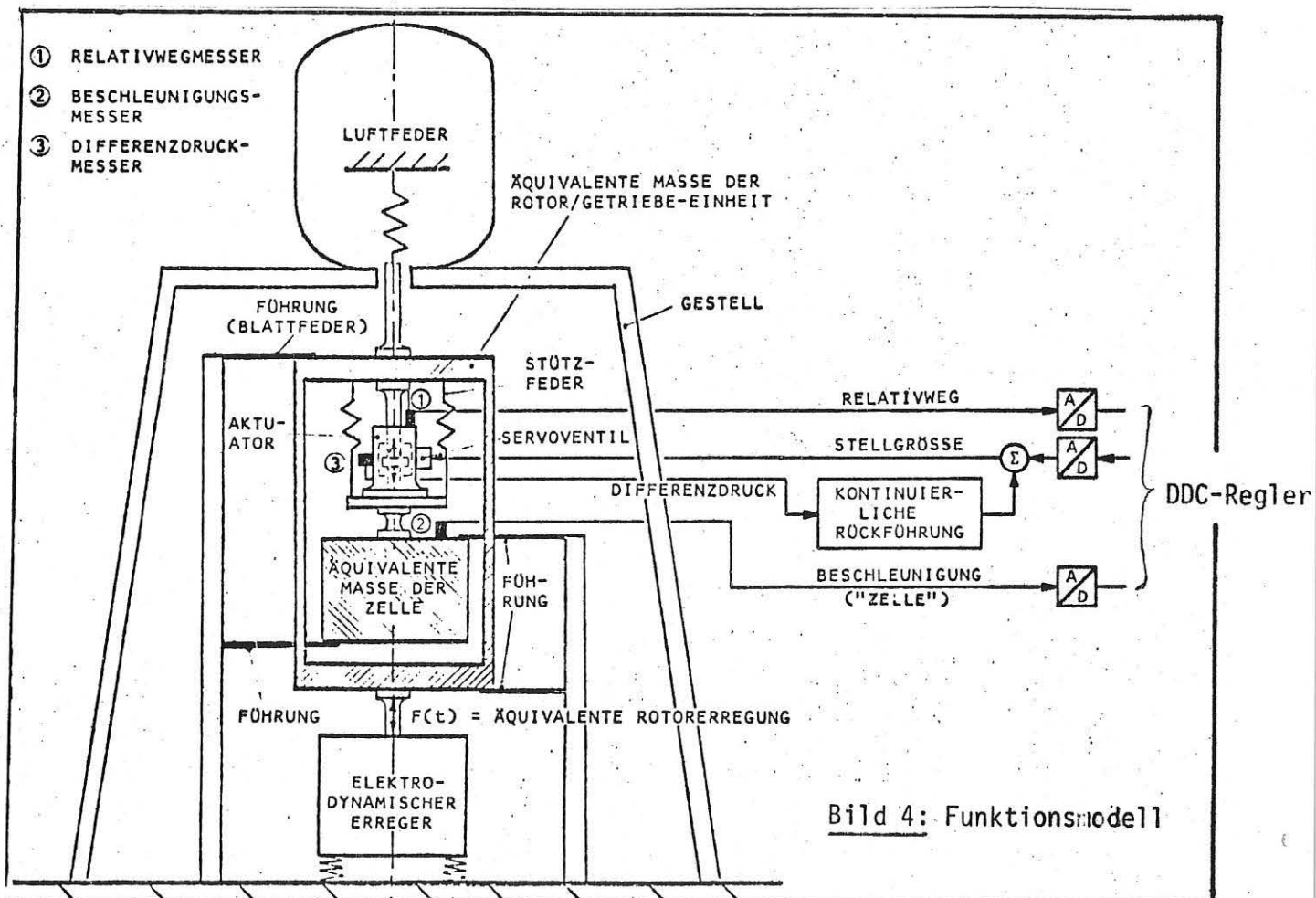
- Unterdrückung bzw. starke Reduzierung der störenden blattzahl-harmonischen Zellenvibrationen (4Ω , 8Ω etc., für Vierblatt-rotoren)
- Begrenzung der statischen bzw. quasistatischen Relativbewegung zwischen Rotor-Getriebe-Einheit und der Zelle bei Abfangmanöver

Parallel zu dem regelbaren Kraftgenerator (**Bild 3**), sind Feder und Dämpfer geschaltet, um eine Gewährleistung der Betriebssicherheit beim Ausfall des Kraftgenerators (Fail-safe) zu erreichen.

Die Dynamik dieses gesamten Regelelementes wird näherungsweise durch lineare DGLn (Differentialgleichungen) beschrieben.



Im vorliegenden Bericht wird die Reglerauslegung für einachsige starre und elastische Hubschrauber-Rechenmodelle untersucht.



Ferner werden in diesem Bericht zwei Funktionsrechenmodelle untersucht.

Der erste Teil des Berichtes enthält die Reglerauslegung für ein Differentialgleichungsmodell 5ter Ordnung.

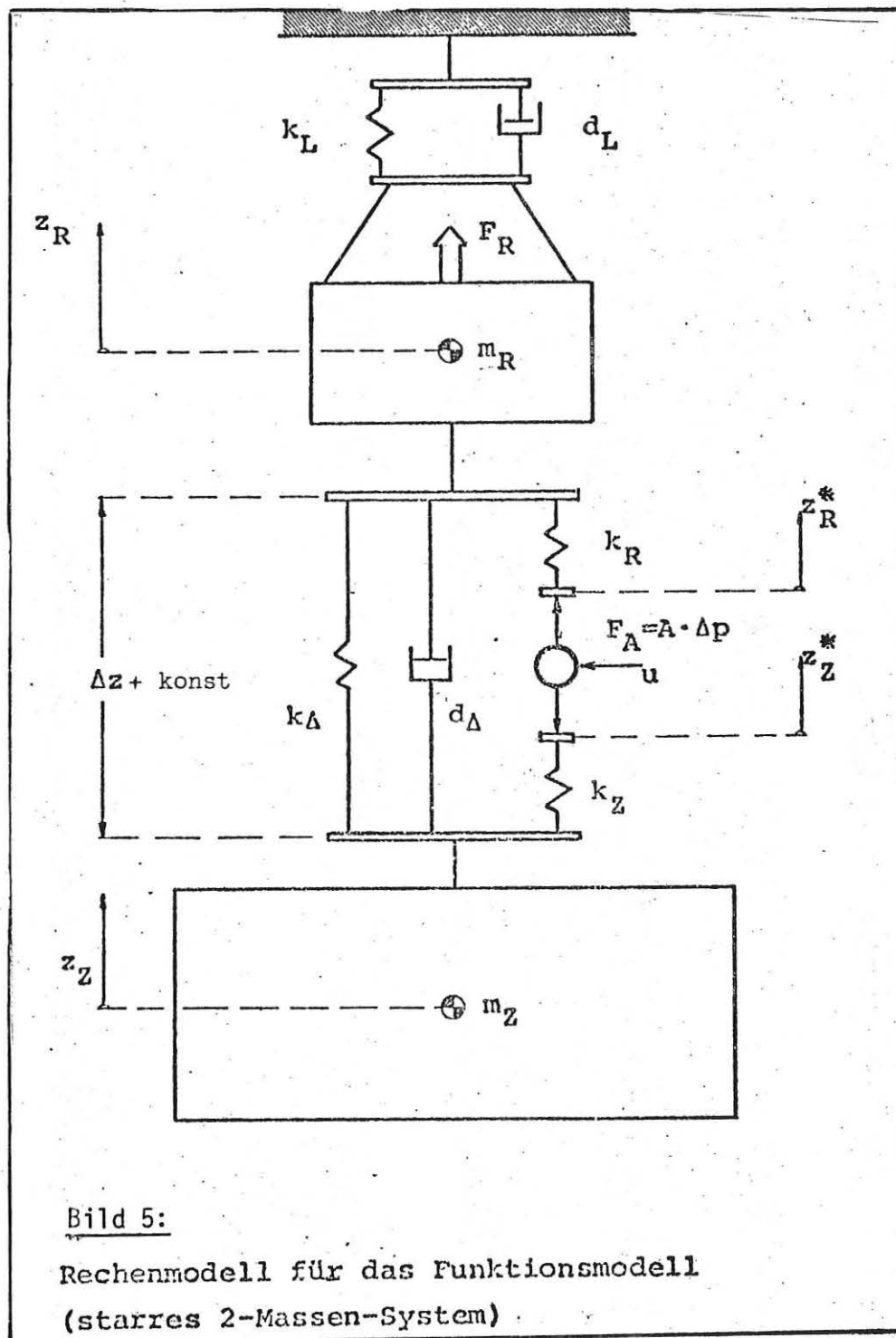
Dabei wird mittels eines Riccati-Entwurfs der Einfluß von verschiedenen Rückführungen (Sensoren) auf die Regelung im Zeit und Frequenzbereich untersucht.

Die Grundelemente des Reglers sind Notch-Glieder zur Kompensation der Vibrationen und Integratoren zur Begrenzung der Relativbewegung zwischen der Rotor-Getriebe-Einheit und der Zelle.

Im zweiten Teil wird die Reglerauslegung für Modelle mit elastischen Freiheitsgraden untersucht.

1. Modellgleichung, Modelldaten und Entwurfskriterien

1.1 Rechenmodell für das 2-Massensystem mit und ohne Zellenelastizität



Die Differentialgleichungen eines 2-Massen-Schwingers und des elektrohydraulischen Servozylinders (siehe Bild 5) können in der Form

$$\frac{d}{d\psi} (\underline{x}_s) = \underline{A}_s \cdot \underline{x}_s + \underline{b}_s \cdot u + \underline{b}_v \cdot v ; \underline{y} = \underline{C}_s \cdot \underline{x}_s + \underline{d}_s \cdot u$$

zusammengefaßt werden.

worin sind:

\underline{x}_s = Zustandsvektor der Strecke

\underline{A}_s = Systemmatrix der Strecke

\underline{b}_s = Eingangsvektor der Strecke

u = Stellgröße

v = Störgröße

In [1] sind als Ausgangsgrößen des Systems die Größen

Δz = relative Verschiebung Rotor-Zelle

F_I = Isolatorkraft und die daraus resultierende Zellenbeschleunigung z_z'' gewählt.

$$\left(z_z'' = \frac{F_I}{m_z}, F_I = k_\Delta \cdot \Delta z + d_\Delta \cdot \Delta z' - A \cdot \Delta p \right)$$

Diese Dynamikgleichungen des elektrohydraulischen Kraft-Generators lassen sich in zwei Teilsysteme aufspalten.

I. Teilsystem: elektrohydraulischer Kraft-Isolator mit Aktuator-Ventil-Dynamik

II. Teilsystem: elektrohydraulischer Kraft-Isolator ohne Aktuator-Ventil-Dynamik

(siehe auch unter 1.2)

Um das Reglerverhalten bei elastischen Zellenstrukturen zu untersuchen, wurde die Hubschrauberzelle als Balken-Einzelmassen-System idealisiert.

Mit diesen Idealisierungen wird angestrebt, die Eigenfrequenzen in der Nähe der Rotorharmonischen (7 Hz), der 1. (28 Hz) und der 2. (56 Hz) Blattzahlharmonischen, sowie im "Erregungspunkt" eine annehmbare Modalauslenkung zu bekommen.

I. Strecke mit Aktuator-Dynamik

("schnelle" Ventil/Aktuatordynamik)

a) Starres Simulationsmodell

$$\text{Zustand: } \underline{x}_0^T = [\Delta \bar{z}, \Delta \bar{z}', \bar{\varepsilon}, \bar{\varepsilon}', \Delta \bar{p}]$$

$$\text{Strecke: } \underline{A}_0 = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\bar{\omega}_\Delta^2}{1-M} & -\frac{2 \cdot \zeta_\Delta \cdot \bar{\omega}_\Delta}{1-M} & 0 & 0 & \frac{\gamma}{1-M} \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -\bar{\omega}_{SV}^2 & -2 \cdot \zeta_{SV} \cdot \bar{\omega}_{SV} & 0 \\ 0 & -\frac{\bar{\omega}_A^2}{\gamma} (1-M) & \bar{K}_\varepsilon \cdot \frac{\bar{\omega}_A^2}{\gamma} (1-M) & 0 & -\frac{1}{\bar{\tau}_A} \end{bmatrix}$$

$$\text{Eingangsvektor: } \underline{b}_0^T = [0, 0, 0, \bar{\omega}_{SV}^2 \cdot \bar{K}_i, 0]$$

$$\text{Störeingangsvektor: } \underline{b}_v^T = [0, \frac{\delta}{M}, 0, 0, 0,]$$

$$\text{Ausgangsmatrizen: } \underline{c} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \bar{K}_\Delta & \bar{d}_\Delta & 0 & 0 & -\bar{A} \end{bmatrix} \quad \underline{d} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$\text{Transformation: } \underline{T}_0 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \frac{\delta}{1-M} \end{bmatrix}$$

$$\text{Ausgangssignal: } \underline{y}^T = [\Delta \bar{z}, \bar{F}_I]$$

b) Elastisches Simulationsmodell

$$\begin{matrix} \mathbf{X}_s' \\ 15 \end{matrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \frac{\mathbf{X}_s}{s} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \cdot \bar{i} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 6,52456 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \cdot \bar{F}_R$$

$$\begin{bmatrix} -2,95147 & -2,14073 & -519,09314 & -3,87768 & -5023,22656 & 36,67709 & -0,19743 & -0,14443 & -2,44541 & -0,01364 & -11,56802 & 0 \\ -0,00373 & -1,27324 & 0 & 0 & -0,00002 & 0,04626 & -0,00025 & -0,02257 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -0,00373 & 0 & -18,0242 & 0 & -0,00001 & 0,04377 & -0,00024 & 0 & -0,08491 & 0 & 0 & 0 \\ -0,00007 & 0 & 0 & -32,31564 & 0 & 0,00086 & 0 & 0 & 0 & -0,11369 & 0 & 0 \\ -0,00271 & 0 & 0 & 0 & -75,42378 & 0,03361 & -0,00018 & 0 & 0 & 0 & -0,17369 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -805,33179 & -204,12567 & 0 & 0 & 0 & 0 & -28,37837 \end{bmatrix}$$

$$\begin{matrix} \mathbf{Y}_p' \\ 15 \end{matrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0,34485 & 0 & 0 & 0 & 0 & -4,2709 & 0,02299 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \mathbf{X}_s \text{ in Kurzform}$$

$$\frac{\mathbf{X}_s'}{s} = \underline{\underline{A}} \cdot \frac{\mathbf{X}_s}{s} + \underline{\underline{b}}_s \cdot \bar{i} + \underline{\underline{b}}_{vs} \cdot \bar{F}_R ; \quad \mathbf{Y}_s = \underline{\underline{C}} \cdot \mathbf{X}_s$$

$$\text{mit } \underline{\underline{X}}_s^T = [\Delta \bar{z}, n_1, n_2, n_3, n_4, \Delta \bar{p}, \Delta \bar{z}', n_1', n_2', n_3', n_4', \Delta \bar{p}']$$

$$\underline{x}_s^T = [\Delta \bar{z}, \eta_1, \eta_2, \eta_3, \eta_4, \Delta \bar{p}, \Delta \bar{z}', \eta_1', \eta_2', \eta_3', \eta_4', \Delta \bar{p}']$$

worin $\eta_1, \eta_2, \eta_3, \eta_4$ die Modalformen und deren Ableitungen

$\eta_1', \eta_2', \eta_3', \eta_4'$ siehe [2].

II. Strecke ohne Aktuator-Dynamik

("langsame" Relativbewegung der Rotor-Getriebe-Masse)

a) Starres Entwurfsmodell

Zustand: $\underline{x}_0^T = [\Delta \bar{z}, \Delta \bar{z}']$

Strecke: $\underline{A}_0 = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$

Eingangsvektor: $\underline{b}_0^T = [0, -\frac{\delta}{(1-M) \cdot M}]$

Störeingangsvektor: $\underline{b}_{v0}^T = [0, \frac{\delta}{M}]$

Ausgangsmatrizen: $\underline{C} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad \underline{d} = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}$

Transformation: $\underline{T}_0 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \frac{\delta}{1-M} \end{bmatrix}$

Ausgangssignal: $\underline{y}^T = [\Delta \bar{z}, \bar{F}_I]$

Steuersignal: $u = \bar{F}_I$

b) Elastisches Entwurfsmodell

Zustand: $\underline{x}_0^T = [\Delta \bar{z}, n_1, n_2, n_3, n_4, \Delta \bar{z}', n_1', n_2', n_3', n_4']$

Strecke: $\underline{A}_0 =$

0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
0	0	0	0	0	0	0	0	-36,78	1
0	-130,75	2815,2	-19695	5403,3	0,00001	-2,6259	14,447	0	4,6823
0	-0,99173	-15,188	0	0	0	0,019917	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0,077943	-2,21419	0
0	0	0	-114,69	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	-532,66	0	0	0	0	-0,46159

Störeingangs-
vektor: $\underline{B}_0^T = [0, 0, 0, 0, 0, \frac{\delta}{M}, 0, 0, 0, 0,]$

Ausgangs-
matrizen: $\underline{C} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \underline{d} = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}$

Ausgangssignal: $\underline{y}^T = [\Delta \bar{z}, \bar{F}_I]$

Steuersignal: $u = \bar{F}_I$

1.3 Entwurfskriterien

Schwingungsisolation: Vollständige Kompensation der ersten und zweiten blattzahlharmonischen Rotorstörfrequenzen (auf der Zelle).

$$\bar{F}_R = 0,129078 \cdot (\cos 4\psi + 0,4 \cdot \cos 8\psi)$$

D.h. die vom Stellsystem auf die Zelle übertragene Kraft \bar{F}_I soll nach Null gehen bzw. die Zellenbeschleunigung Z''_Z soll im eingeschwungenen Zustand gegen Null gehen.

$$\lim_{\psi \rightarrow \infty} \bar{F}_I \rightarrow 0$$

$$\psi \rightarrow \infty$$

$$\lim_{\psi \rightarrow \infty} Z''_Z \rightarrow 0$$

$$\psi \rightarrow \infty$$

für

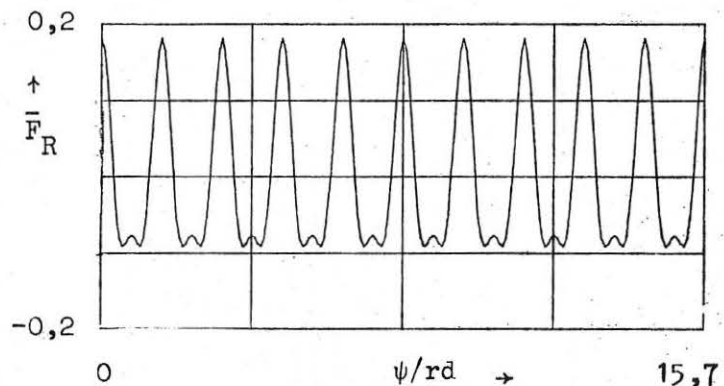


Bild 7: Vibrationsstörkraft $\bar{F}_R = 0,129078 \cdot (\cos 4\psi + 0,4 \cdot \cos 8\psi)$

(diese Forderungen sind für das starre Hubschrauberrechenmodell identisch).

Getriebetrimmung: Begrenzung der statischen bzw. quasistatischen Relativauslenkungen zwischen der Rotor-Getriebe-Einheit und der Zelle bei Flugfällen mit einem Zustandslastvielfachen $\Delta n = 1,5$ (harte Rampe).

$$\lim_{\psi \rightarrow \infty} \Delta z \rightarrow 0$$

$$\psi \rightarrow \infty$$

(Eingeschwungener Zustand)

für

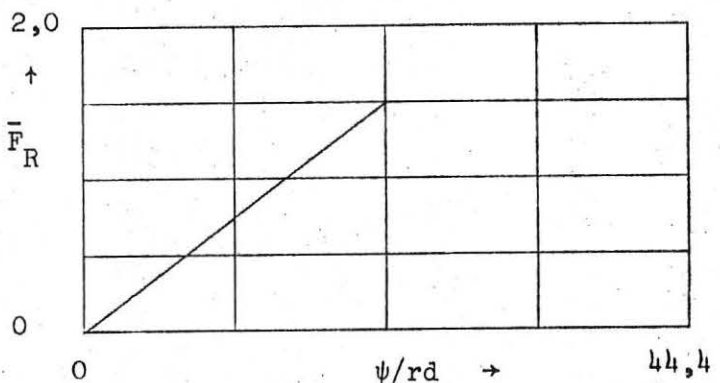


Bild 8: Störkraft \bar{F}_R (harte Rampe)

Bzw. der vorgegebene Maximalausschlag von $\Delta \bar{z} \approx 0,3$ soll nicht überschritten werden.

Beide Kriterien lassen sich mit Hilfe der aktiven Störgrößenkompensation in Verbindung mit den Eingangsgrößen (\bar{F}_I) in die Notch-Glieder berücksichtigen. (siehe Bild 1.3.1 und 1.3.2)

Durch die Notch-Elemente in der Vibrationsrückführung werden die Störfrequenzen bei 4Ω und 8Ω kompensiert (4Ω und 8Ω Notch-Filter).

Durch einen Integrator in der Trimmrückführung wird die Relativauslenkung im eingeschwungenen Zustand auf Null gebracht (0Ω Notch-Filter).

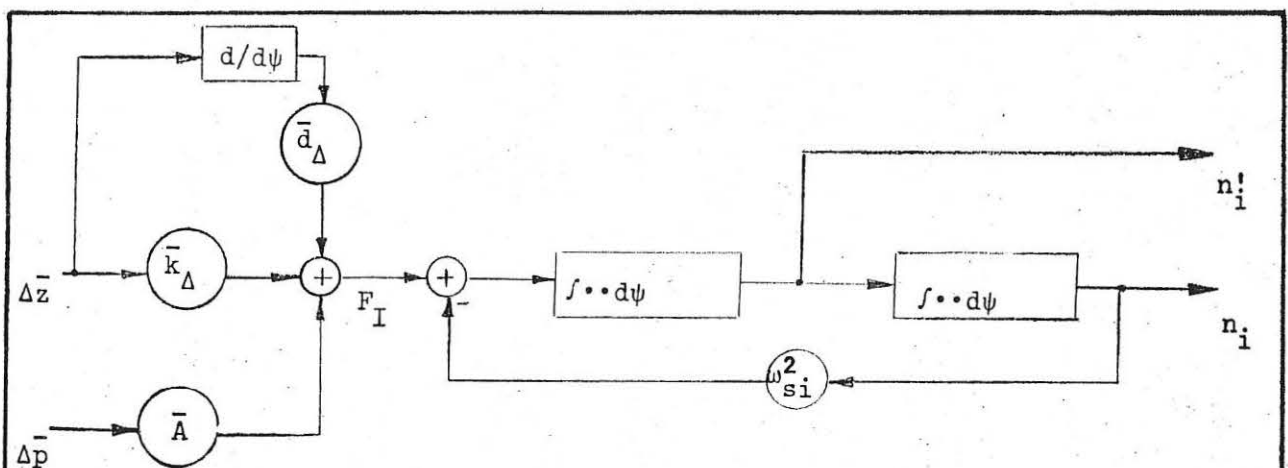


Bild 1.3.1: Reglerelement bei Messung von $\Delta \bar{p}$, $\Delta \bar{z}$ und Differentiation von $\Delta \bar{z}$.

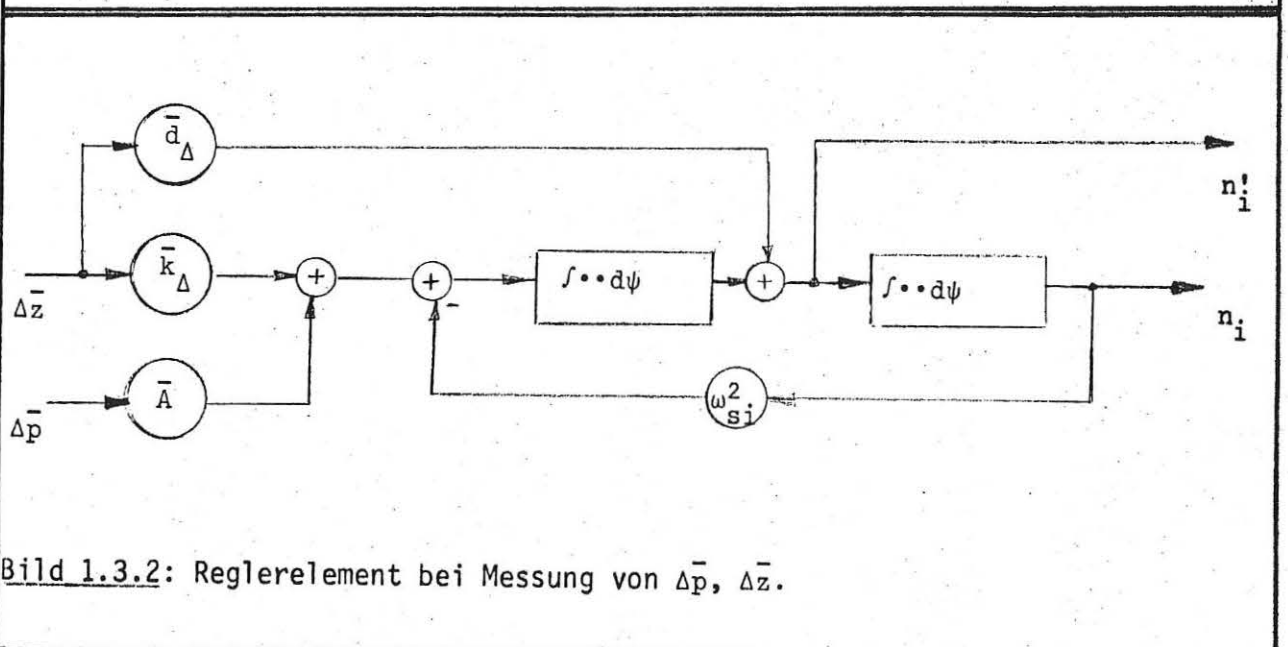


Bild 1.3.2: Reglerelement bei Messung von $\Delta \bar{p}$, $\Delta \bar{z}$.

2. Reglerentwurf für ein starres 2-Massensystem

Die im Abschnitt 1.2 (Seite 12) aufgeführten Gleichungssysteme wurden zur Kompensation von Lastvielfachen um einen Integrator und zur Tilgung der 4Ω- und 8Ω - Vibration um Notch-Isolatoren erweitert.

Notch Filterdynamik bei der Rückführung von $\Delta \bar{z}$ und $\Delta \bar{p}$:

(siehe Bild 1.3.2)

$$\begin{bmatrix} \dot{n}_i \\ \dot{n}_i' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\omega_{s_i}^2 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} n_i \\ n_i' \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \bar{d}_\Delta & 0 \\ \bar{k}_\Delta & -\bar{A} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta \bar{z} \\ \Delta \bar{p} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} y_{n_i} \\ y_{n_i}' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} n_i \\ n_i' \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ \bar{d}_\Delta & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta \bar{z} \\ \Delta \bar{p} \end{bmatrix}$$

Die Zustands- und Meßgleichungen der "integrierten" Notch Filter lauten:

$$\begin{bmatrix} \dot{n}_0 \\ \dot{n}_4 \\ \dot{n}_4' \\ \dot{n}_8 \\ \dot{n}_8' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & & & & \\ & 0 & 1 & & \\ & -16 & 0 & & \\ & & & 0 & 1 \\ & & & -64 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} n_0 \\ n_4 \\ n_4' \\ n_8 \\ n_8' \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 2,16 \cdot 10^{-3} & 0 \\ 0,612 & -2,66 \\ 2,16 \cdot 10^{-3} & 0 \\ 0,612 & -2,66 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta \bar{z} \\ \Delta \bar{p} \end{bmatrix}$$

$$(\omega_{s_1} = 4 ; \omega_{s_2} = 8, \bar{d}_\Delta = 2,16 \cdot 10^{-3}, \bar{k}_\Delta = 0,612, \bar{A} = 2,66)$$

$$\begin{bmatrix} y_{n_0} \\ y_{n_4} \\ y_{n_4'} \\ y_{n_8} \\ y_{n_8'} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & & & & \\ & 1 & & & \\ & & 1 & & \\ & & & 1 & \\ & & & & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} n_0 \\ n_4 \\ n_4' \\ n_8 \\ n_8' \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 2,16 \cdot 10^{-3} & 0 \\ 0 & 0 \\ 2,16 \cdot 10^{-3} & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta \bar{z} \\ \Delta \bar{p} \end{bmatrix}$$

Notchfilterdynamik bei der Rückführung von $\Delta \bar{z}$ und $\Delta \bar{z}'$

$$\begin{bmatrix} \dot{n}_i \\ \dot{n}_i' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\omega_{s_i}^2 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} n_i \\ n_i' \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \bar{k}_\Delta & \bar{d}_\Delta \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta \bar{z} \\ \Delta \bar{z}' \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} y_{n_i} \\ y_{n_i'} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} n_i \\ n_i' \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta \bar{z} \\ \Delta \bar{z}' \end{bmatrix}$$

Die Zustands- und Meßgleichungen der integrierten Notch Filter lauten:

$$\begin{bmatrix} \dot{n}_0 \\ \dot{n}_4 \\ \dot{n}_4' \\ \dot{n}_8 \\ \dot{n}_8' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & & & & \\ & 0 & 1 & & \\ & -16 & 0 & & \\ & & & 0 & 1 \\ & & & -64 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} n_0 \\ n_4 \\ n_4' \\ n_8 \\ n_8' \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0,612 & 2,16 \cdot 10^{-3} \\ 0 & 0 \\ 0,612 & 2,16 \cdot 10^{-3} \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta \bar{z} \\ \Delta \bar{z}' \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} y_{n_0} \\ y_{n_4} \\ y_{n_4'} \\ y_{n_8} \\ y_{n_8'} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & & & & \\ & 1 & & & \\ & & 1 & & \\ & & & 1 & \\ & & & & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} n_0 \\ n_4 \\ n_4' \\ n_8 \\ n_8' \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta \bar{z} \\ \Delta \bar{z}' \end{bmatrix}$$

2.1 Starres 2-Massensystem mit der Steuergröße $u = \bar{i}$

(Zweite Form des vollständigen Systems aus [1]).

$$\begin{bmatrix} \Delta \bar{z} \\ \Delta \bar{z}' \\ \bar{\varepsilon} \\ \bar{\varepsilon}' \\ \Delta \bar{p} \end{bmatrix}' = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ -9,4505 & -0,0334 & 0 & 0 & 41,071 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -801,5 & -28,311 & 0 \\ 0 & -64,684 & 967,94 & 0 & -32,292 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \bar{z} \\ \Delta \bar{z}' \\ \bar{\varepsilon} \\ \bar{\varepsilon}' \\ \Delta \bar{p} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 205,6 \\ 0 \end{bmatrix} \bar{i} + \begin{bmatrix} 0 \\ 13,1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \bar{F}_R$$

bzw. in Kurzform: $\underline{\dot{x}}_0 = \underline{A}_0 \underline{x} + \underline{b}_0 \cdot \bar{i} + \underline{b}_{v_0} \cdot \bar{F}_R$

Der Zustandsvektor $\underline{x}_0^T = [\Delta \bar{z}, \Delta \bar{z}', \bar{\varepsilon}, \bar{\varepsilon}', \Delta \bar{p}]$ enthält als Komponenten die normierte Relativauslenkung $\Delta \bar{z} = \frac{\Delta z}{\delta_0}$ zwischen Rotor-Getriebe-Einheit und Zelle, deren Ableitung $\Delta \bar{z}'$ nach dem Azimutwinkel ψ , die normierte Servoventilauslenkung $\bar{\varepsilon} = \frac{\varepsilon}{\delta_0}$ und deren Ableitung $\bar{\varepsilon}'$ sowie dem normierten Differenzdruck $\Delta \bar{p} = \frac{\Delta p}{\Delta p_{\max}}$ des Aktuators.

Steuergröße ist der normierte Ventilsteuerstrom $\bar{i} = \frac{i}{i_{\max}}$.

Die Eigenwerte dieses Entwurfsmodells sind:

Realteile:	- 14,1554	Imaginärteile:	24,51788
	- 14,1554		- 24,51788
	- 16,10547		49,03148
	- 16,10547		- 49,03148
	- 0,11458		0,0

Als Eingangsgrößen in den Regler stehen die folgenden Meßgrößen zur Verfügung.

- Relativauslenkung $\Delta \bar{z}$
- Druckdifferenz $\Delta \bar{p}$ des Aktuators
- Aktuatoranschlußbeschleunigung \bar{b}_A
- Durch Differentiation auch $\Delta \bar{z}'$

2.1.1 Reglerentwurf

Der Reglerentwurf (Riccati-Regler) wurde für das folgende, um die Reglerdynamik erweiterte System durchgeführt, worin die Aktuatoranschlußkraft \bar{F}_T genotcht wurde (siehe Bild 1.3.2).

[illegible]

Im Kurzform: $\underline{X}' = \underline{A} \cdot \underline{X} + \underline{b} \cdot \bar{i} + \underline{b}_v \cdot \bar{F}_R$

$$\underline{Y} = \underline{C} \cdot \underline{X}$$

worin ist:

$$\underline{C} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0,612 & 0,00216 & 0 & 0 & -2,66 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\underline{Y}^T = [\Delta \bar{z}, \Delta \bar{p}, \bar{F}_I] ; \quad \bar{F}_I = \bar{k}_\Delta \cdot \Delta \bar{z} + \bar{d}_\Delta \cdot \Delta \bar{z}' - \bar{A} \cdot \Delta \bar{p}$$

Regler-Konfiguration:

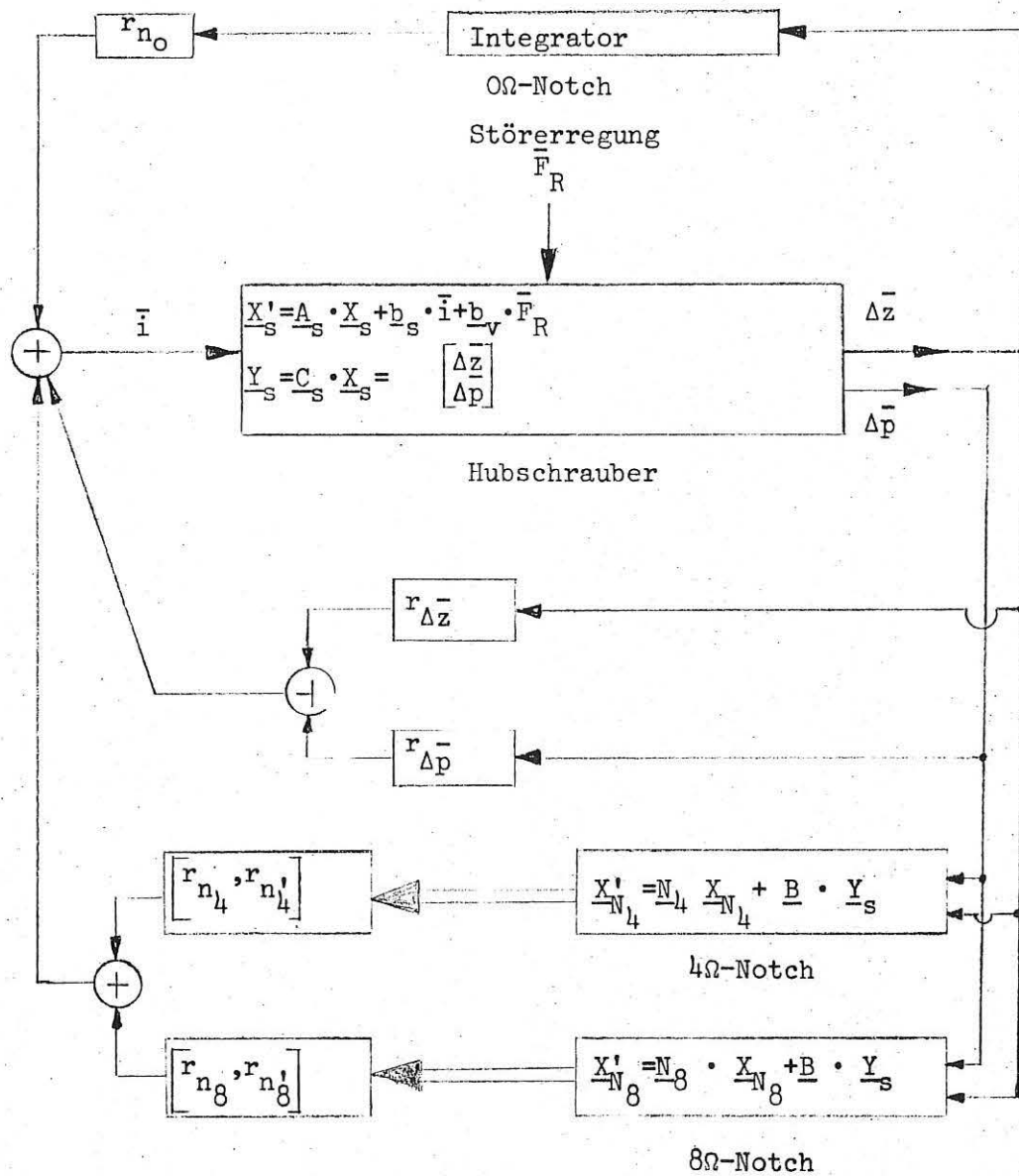


Bild 2.1.1 Reglerkonfiguration bei Messung der Relativauslenkung und Aktuatordruckdifferenz.

Aus der Beziehung $\bar{F}_I = \bar{k}_\Delta \cdot \Delta \bar{z} + \bar{d}_\Delta \cdot \Delta \bar{z}' - \bar{A} \cdot \Delta \bar{p}$

$$= 0,61185 \Delta \bar{z} + 0,002161 \Delta \bar{z}' - 2,659 \cdot \Delta \bar{p}$$

(und $\bar{F}_I = \bar{m}_z \cdot \bar{z}''$) ist ersichtlich, daß die Isolatorkraft in dem zu minimierenden quadratischen Integralkriterium $J = \int_0^\infty (\underline{x}^T \cdot \underline{Q} \cdot \underline{x} + \underline{u}^T \cdot \underline{R} \cdot \underline{u}) d\psi$ erfasst werden kann, d.h. \bar{F}_I^2 zum Minimum gemacht werden kann.

$$\bar{F}_I^2 = \bar{k}_\Delta^2 \cdot \Delta \bar{z}^2 + \bar{d}_\Delta^2 \cdot \Delta \bar{z}'^2 + \bar{A}^2 \Delta \bar{p}^2 + 2 \cdot \bar{k}_\Delta \cdot \bar{d}_\Delta \Delta \bar{z} \cdot \Delta \bar{z}' - 2 \cdot \bar{k}_\Delta \cdot \bar{A} \cdot$$

$$\Delta \bar{z} \cdot \Delta \bar{p} - 2 \cdot \bar{d}_\Delta \cdot \bar{A} \cdot \Delta \bar{z} \cdot \Delta \bar{p}$$

Wobei die Haupt- und Nebendiagonalelemente der \underline{Q} -Matrix wie folgt besetzt werden.

$$\underline{Q} = \begin{bmatrix} 0,3744 & 13,22 \cdot 10^{-2} & 0 & 0 & -1,627 & & & & \\ 13,22 \cdot 10^{-2} & 46,7 \cdot 10^{-5} & 0 & 0 & -57,47 \cdot 10^{-2} & & & & \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & & & & \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & & & & \\ -1,627 & -57,47 \cdot 10^{-2} & 0 & 0 & 7,0703 & & & & \\ & & & & & 10 & & & \\ & & & & & & 100 & & \\ & & & & & & & 100 & \\ & & & & & & & & 40 \\ & & & & & & & & & 40 \end{bmatrix}$$

Da die "Verstärkung" der nicht gemessenen Zustände in der \underline{Q} - Matrix bis auf den Wert 7,0703 der Hauptdiagonale klein sind wurde im folgenden die \underline{Q} - Matrix modifiziert.

Dabei wird die Wichtungsmatrix \underline{Q} derart bestimmt, daß im resultierenden Rückführvektor \underline{r} die Verstärkungen \underline{k}_i der nicht gemessenen Zustände \underline{x}_i (ohne Stabilitätsverlust des Gesamtsystems) zu Null gemacht werden können.

$$\underline{Q} = \begin{bmatrix} \circ & \\ & \begin{matrix} x & & & \\ & x & & \\ & & x & \\ & & & x \\ & & & & x \end{matrix} \end{bmatrix}$$

modifizierte Form der \underline{Q} - Matrix

Bemerkung:

Bei allen Reglerentwürfen wurde diese modifizierte Form der \underline{Q} - Matrix zugrunde gelegt.

Mit den Wichtungsmatrizen

$$\underline{Q} = \begin{bmatrix} \circ & & & & & & & \\ & & & & & & & \\ & & & & & & & \\ & & & & & & & \\ & & & & & & & \\ & & & & & & & \\ & & & & & & & \\ & & & & & & & \end{bmatrix}$$

$$R = 100$$

(Rückführvektor $\underline{x}^T = [-0,2048 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ -0,01293 \ -0,1$
 $4,0411 \ 0,2045 \ 4,978 \ 4,978]$)

ist folgendes Einschwingungsverhalten des Systems erzielt:

Beim Einwirken der Vibrationsstärkraft \bar{F}_R nach Bild 7

siehe Bilder 2.1.2 bis 2.1.5.

Beim Einwirken der Zusatzkraft infolge eines Zusatzlastvielfachen

$\Delta n = 1,5$ nach Bild 8.

siehe Bilder 2.1.6 bis 2.1.9.

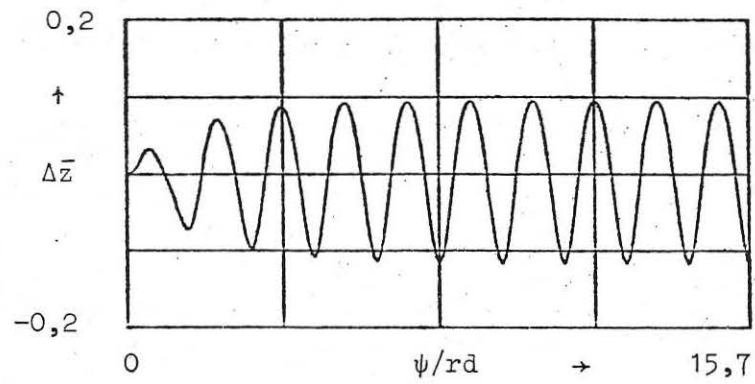


Bild 2.1.2 Relativauslenkung $\Delta \bar{z} = \frac{\Delta z}{\delta_0}$

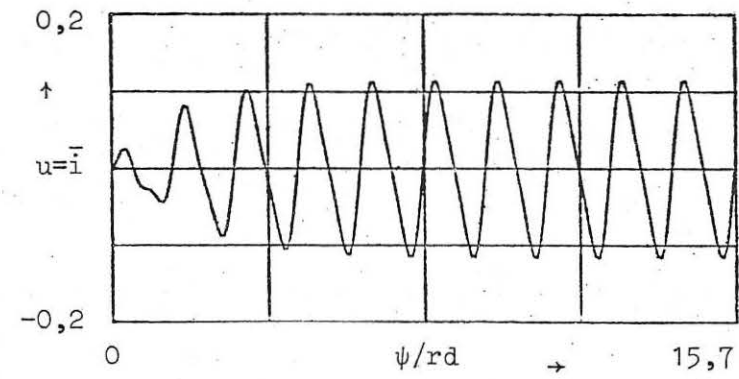


Bild 2.1.4 Steuergröße $u = \bar{i}$

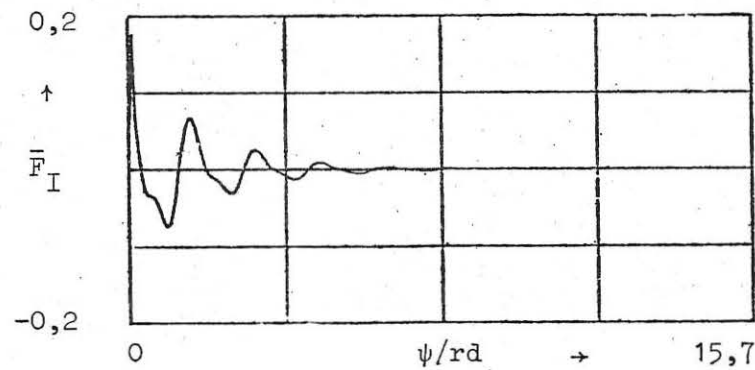


Bild 2.1.3 Isolatorkraft $\bar{F}_I = \frac{F_I}{m \cdot g}$

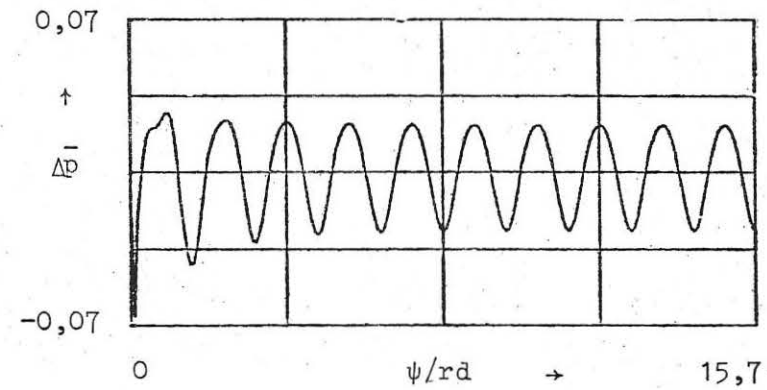


Bild 2.1.5 Aktuatordruckdifferenz $\Delta \bar{p}$

bei Rückführung von Relativauslenkung und Aktuatordruckdifferenz

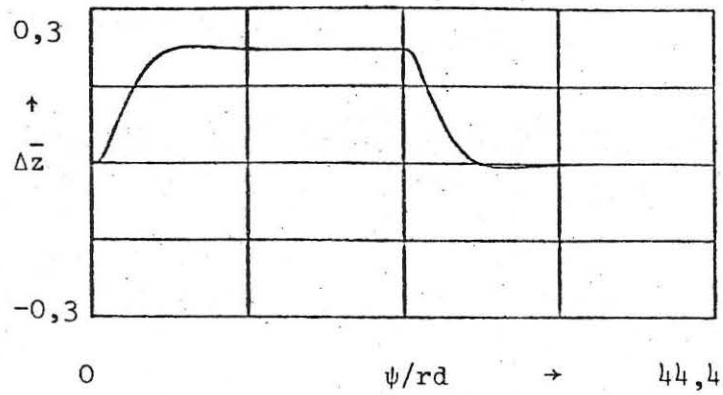


Bild 2.1.6 Relativauslenkung $\Delta \bar{z}$

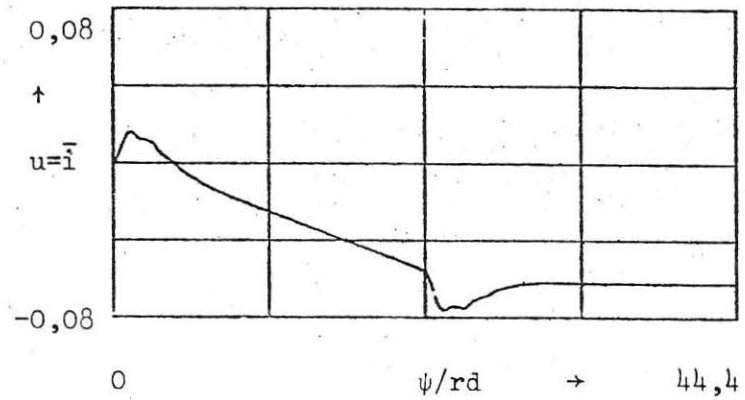


Bild 2.1.8 Steuergröße $u = \bar{i}$

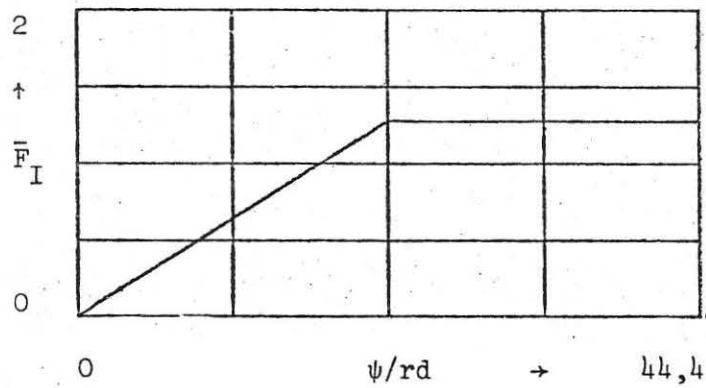


Bild 2.1.7 Isolatorkraft \bar{F}_I

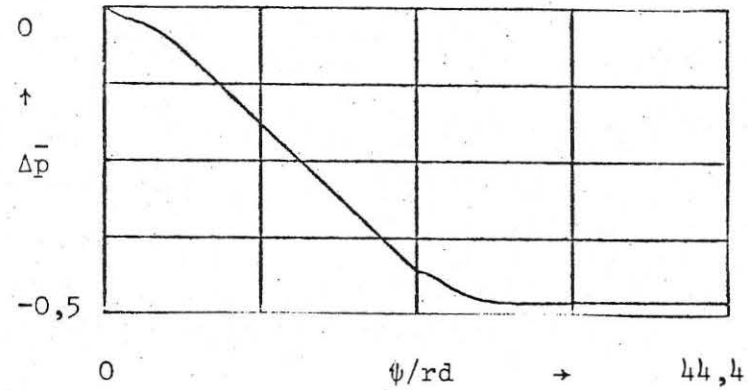


Bild 2.1.9 Aktuatordruckdifferenz $\Delta \bar{p}$

bei Rückführung von Relativauslenkung und Aktuatordruckdifferenz

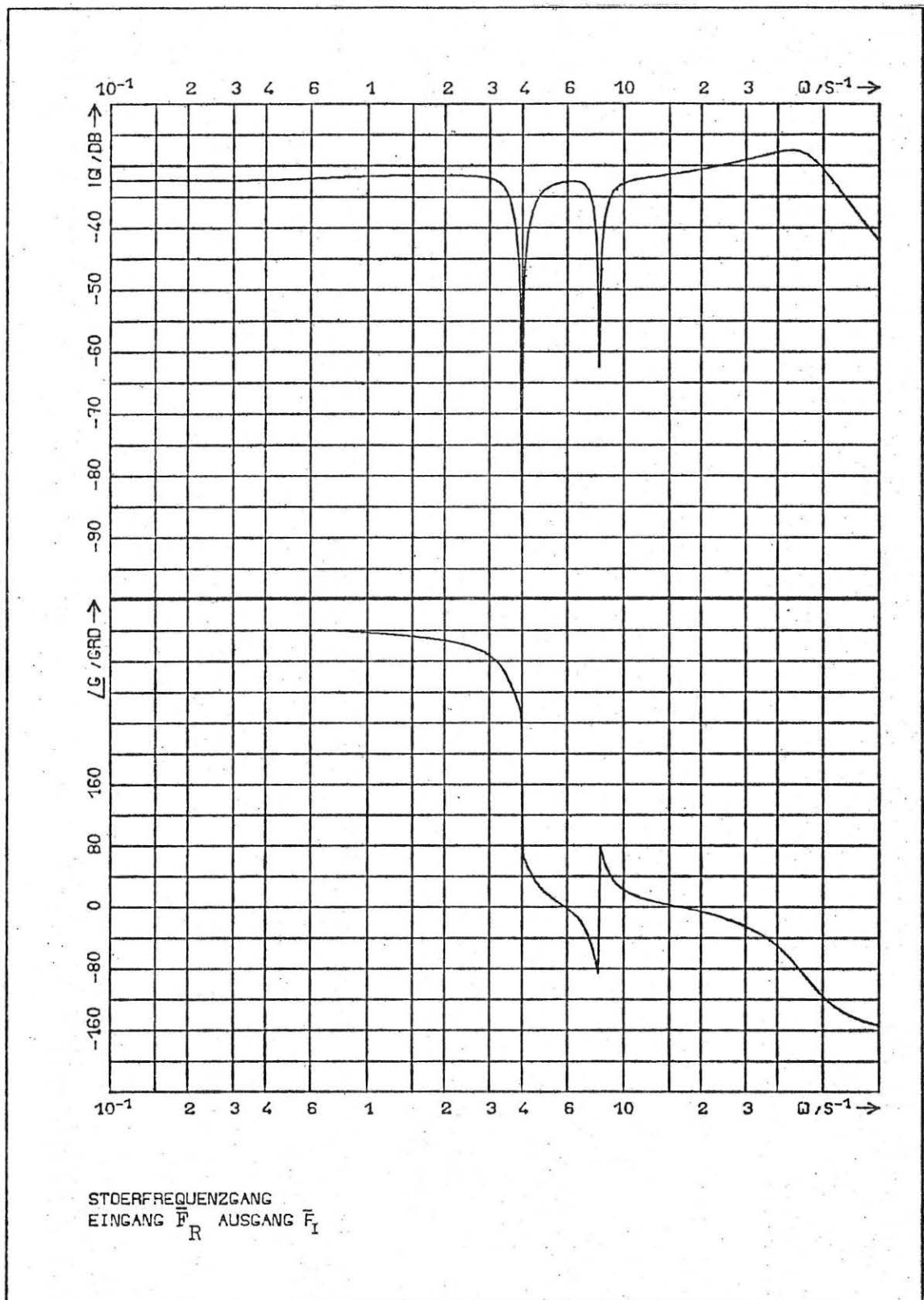


Bild 2.1.10 Störfrequenzgang $\left| \bar{F}_S^*(j\omega) \right| = \left| \frac{\bar{F}_I(j\omega)}{\bar{F}_R(j\omega)} \right|$

bei Rückführung von Relativauslenkung und Aktuatordruckdifferenz.

Das geschlossene System hat die folgenden Eigenwerte:

Realteile:	- 16,156	Imaginärteile:	48,447
	- 16,156		- 48,447
	- 12,427		24,852
	- 12,427		- 24,852
	- 0,68793		7,8674
	- 0,68793		- 7,8674
	- 0,55886		3,8765
	- 0,55886		- 3,8765
	- 0,48751		0,44355
	- 0,48751		- 0,44355

Die Entwurfskriterien (1.3) sind erfüllt und das Abklingen der Isolatorkraft (Bild 2.1.3) erfolgt bei $\psi \approx 7$ rd.

Aufgrund der Beziehung $\bar{F}_I = \bar{m}_z \cdot \bar{z}_z'' = \bar{m}_z \cdot \bar{b}_A$

(\bar{b}_A = Aktuatoranschlußbeschleunigung) wurde für dieses System die

$\bar{b}_A = \bar{z}_z''$ direkt "genotcht".

Das Einschwingungsverhalten und die Störfrequenzgänge sind im Anhang zu finden.

2.2 Starres 2-Massen-System mit der Steuergröße $u = \bar{F}_I$

Die Umrechnung zwischen den Systemen mit der Steuergröße $u = \bar{F}_I$ und $u = \dot{i}$ erfolgt über die Beziehung:

$$\bar{F}_I = \bar{k}_\Delta \cdot \Delta \bar{z} + (\bar{d}_\Delta + \bar{d}_A) \cdot \Delta \bar{z}' - \alpha \cdot \bar{i}$$

(siehe [1]).

Die Dynamikgleichung lautet:

$$\begin{bmatrix} \Delta \bar{z} \\ \Delta \bar{z}' \end{bmatrix}' = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta \bar{z} \\ \Delta \bar{z}' \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ -15,446 \end{bmatrix} \bar{F}_I + \begin{bmatrix} 0 \\ 13,1 \end{bmatrix} \bar{F}_R \quad (1.2.3)$$

bzw. in Kurzform: $\underline{\dot{x}}_0 = \underline{A}_0 \cdot \underline{x}_0 + \underline{b}_0 \cdot \bar{F}_I + \underline{b}_{v_0} \cdot \bar{F}_R$

Der Zustandsvektor $\underline{x}_0^T = [\Delta \bar{z}, \Delta \bar{z}']$ enthält jetzt als Komponenten nur die normierte Relativauslegung $\Delta \bar{z} = \frac{\Delta z}{\delta_0}$ zwischen Rotor-Getriebe-Einheit und Zelle.

Sowie deren Ableitung $\Delta \bar{z}'$ nach dem Rotordrehwinkel ψ .

Steuergröße ist die normierte Isolatorkraft $\bar{F}_I = \frac{F_I}{m \cdot g}$ und Störgröße die auf die Rotor-Getriebe-Einheit einwirkende Kraft $\bar{F}_R = 0,129078 (\cos 4 \cdot \psi + 0,4 \cdot \cos 8 \cdot \psi)$ bzw. die Lasterhöhung infolge eines Abfangmanövers mit ein Zusatzlastvielfaches $\Delta n = 1,5$ (harte Rampe).

Die Eigenwerte dieses Entwurfsmodells sind:

$$\lambda^2 = 0 \rightarrow \lambda_1 = \lambda_2 = 0$$

(Doppelintegrator)

Als Eingangsgrößen in den Regler stehen die folgenden normierten Meßgrößen zur Verfügung.

- Relativauslenkung $\Delta \bar{z}$
- Ableitung der Relativauslenkung $\Delta \bar{z}'$
- und die Stellgröße \bar{F}_I

Für dieses Funktionsmodell mathematisch modelliert durch die Vektordifferentialgleichung (1.2.3) wird ein Regler konstruiert, welcher die Entwurfskriterien (Seite 18) erfüllt.

2.2.1 Reglerentwurf

Der Reglerentwurf (Riccati-Regler) wird für das folgende, um die Reglerdynamik erweiterte System durchgeführt, worin eine konstante Rückführung der

- Strecken-Zustandsgrößen $(\Delta \bar{z}, \Delta \bar{z}')$
- Integrator-Zustandsgröße (n_o)
- Notch-Filter-Zustandsgrößen $(n_4, n_4'$ und $n_8, n_8')$

vorgenommen wurde.

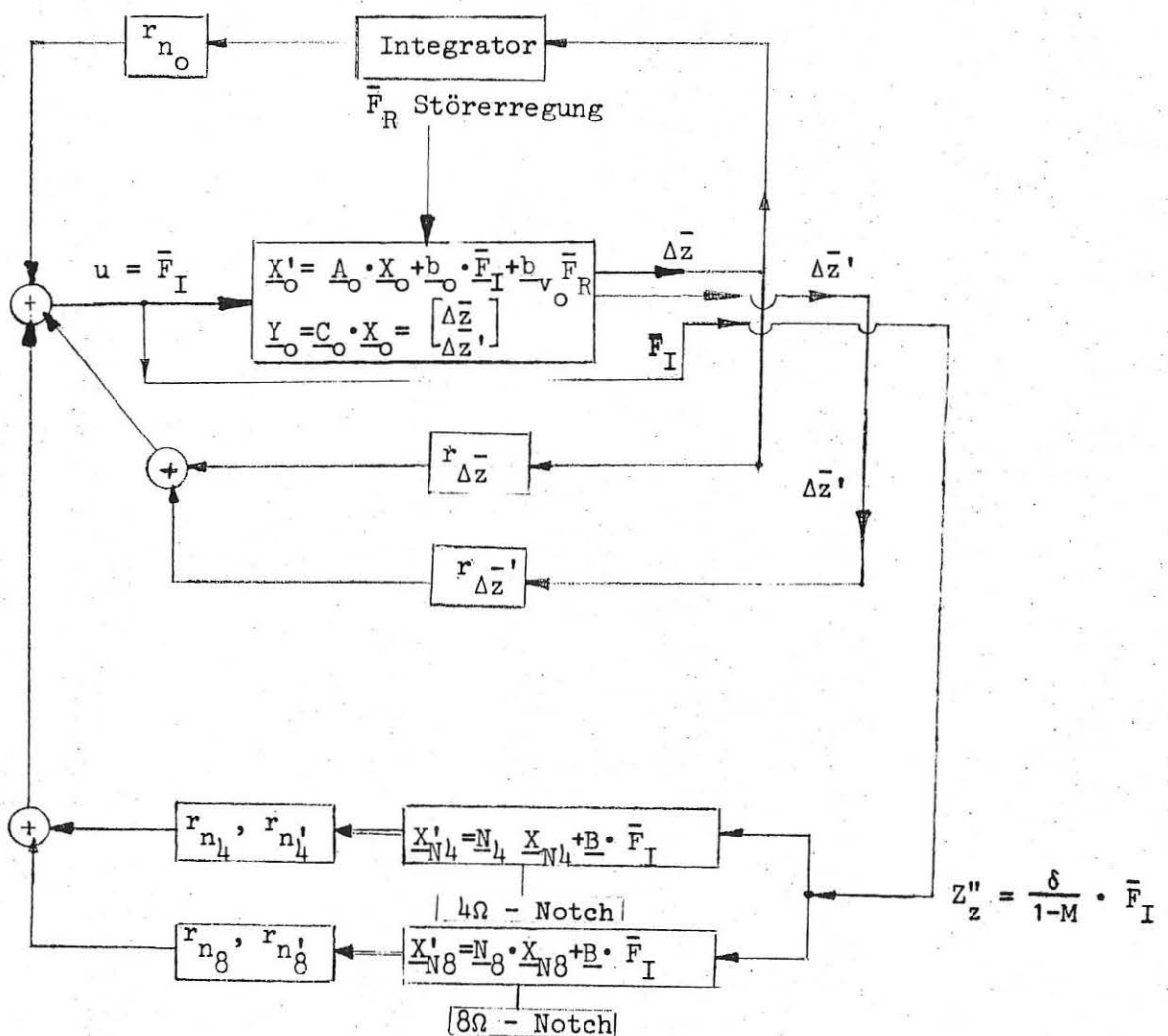


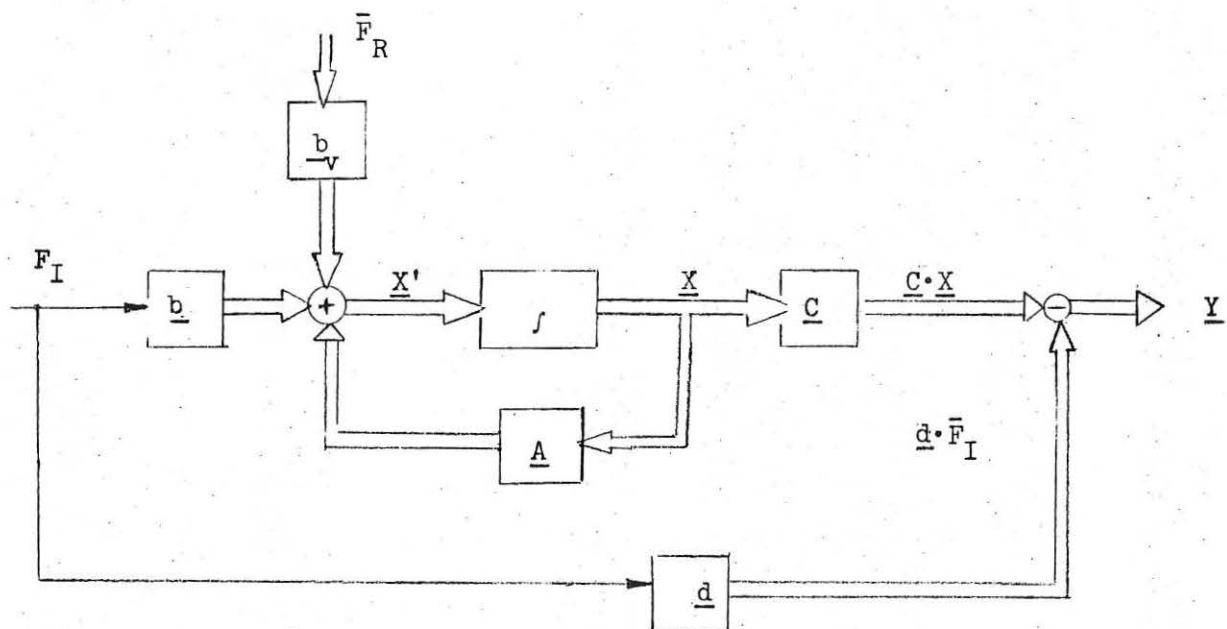
Bild 2.2.1 Reglerkonfiguration bei Messung der Relativauslenkung $\Delta \bar{z}$ und ihrer Ableitung $\Delta \bar{z}'$.

$$\begin{bmatrix} \Delta \bar{z} \\ \Delta \bar{z}' \\ n_0 \\ n_4 \\ n_4' \\ n_8 \\ n_8' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -16 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -64 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta \bar{z} \\ \Delta \bar{z}' \\ n_0 \\ n_4 \\ n_4' \\ n_8 \\ n_8' \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ -15,446 \\ 0 \\ 0 \\ 2,3462 \\ 0 \\ 2,3462 \end{bmatrix} \cdot \bar{F}_I + \begin{bmatrix} 0 \\ 13,1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \cdot \bar{F}_R$$

bzw. in Kurzform: $\underline{X}' = \underline{A} \cdot \underline{X} + \underline{b} \cdot \bar{F}_I + \underline{b}_v \cdot \bar{F}_R$

$$\begin{bmatrix} \Delta \bar{z} \\ \bar{F}_I \\ \bar{z}''_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \bar{\Delta z} \\ \bar{\Delta z}' \\ n_o \\ n_{l_4} \\ n'_{l_4} \\ n_8 \\ n'_8 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 2,3462 \end{bmatrix} \cdot \bar{F}_I$$

$$\underline{Y} = \underline{C} \cdot \underline{X} + \underline{d} \cdot \bar{F}_I$$



$$\begin{aligned} \underline{X}' &= \underline{A} \cdot \underline{X} + \underline{b} \cdot \bar{F}_I + \underline{b}_v \cdot \bar{F}_R \\ \underline{Y} &= \underline{C} \cdot \underline{X} + \underline{d} \cdot \bar{F}_I \end{aligned} \quad (2.2.3)$$

Dynamik des Gesamtsystems: ("langsame" Relativbewegung der Rotor-Getriebe-Masse)

Die Reglerauslegung geschieht durch Minimierung des quadratischen Integralkriteriums.

$$J = \int_0^{\infty} (\underline{x}^T \cdot \underline{Q} \cdot \underline{x} + \underline{u}^T \cdot \underline{R} \cdot \underline{u}) \cdot d\psi$$

worin sind: \underline{x} , \underline{u} : Zustands- bzw. Steuergrößen

\underline{Q} , \underline{R} : Wichtungsmatrizen

Durch die geeignete Wahl der Gewichtsmatrizen läßt sich das Schwingungsverhalten des Systems (mit Reglereinwirkung) beeinflussen, d.h. es läßt sich relativ schnell den gestellten Anforderungen anpassen.

Aus der Beziehung $\bar{F}_{I_z} = \bar{m}_z \cdot \bar{z}_z''$ ist ersichtlich, daß eine Proportionalität zwischen \bar{F}_{I_z} und \bar{z}_z'' besteht.

Für diese Zustandsrückführung für das System (Gleichung 2.2.3) mit den Wichtungsmatrizen

$$\underline{Q} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 10 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 100 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 100 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 40 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 40 \end{bmatrix}$$

$$\underline{R} = 12,5$$

(Rückführvektor $\underline{r}^T = [1,0406 \quad 0,6053 \quad 0,8944 \quad -9,750 \quad -1,599 \quad -13,83 \quad -0,510]$)

wird folgendes Einschwingungsverhalten des Systems erzielt:

Siehe Bilder 2.2.2 bis 2.2.5

Beim Einwirken der Zusatzkraft infolge eines Zusatzlastvielfachen $\Delta n=1,5$ nach Bild 8.

Siehe Bilder 2.2.6 bis 2.2.9

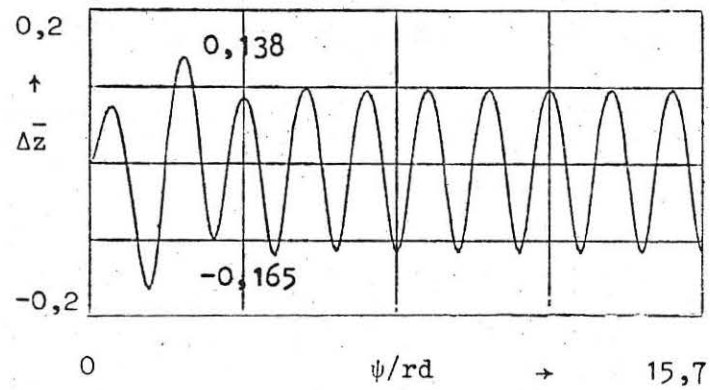


Bild 2.2.2. Relativauslenkung $\Delta \bar{z}$

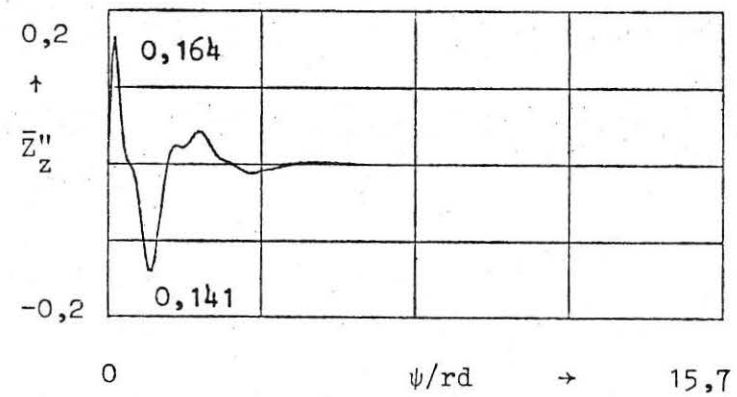


Bild 2.2.4 Zellenbeschleunigung \bar{z}''

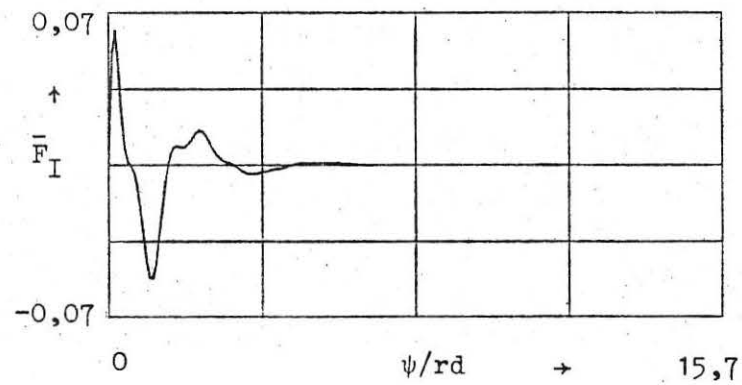


Bild 2.2.3 Isolatorkraft \bar{F}_I

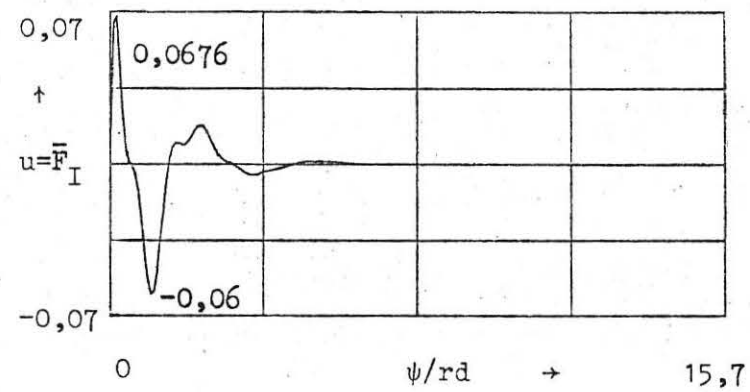


Bild 2.2.5 Steuergröße $u = \bar{F}_I$

bei Rückführung von Relativauslenkung $\Delta \bar{z}$ und ihrer Ableitung $\Delta \bar{z}'$

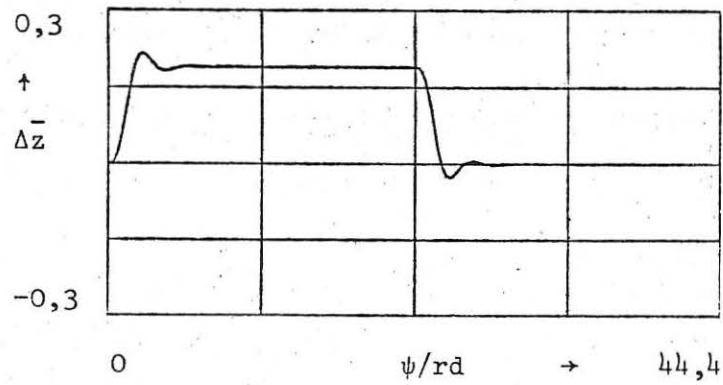


Bild 2.2.6 Relativauslenkung $\Delta \bar{z}$

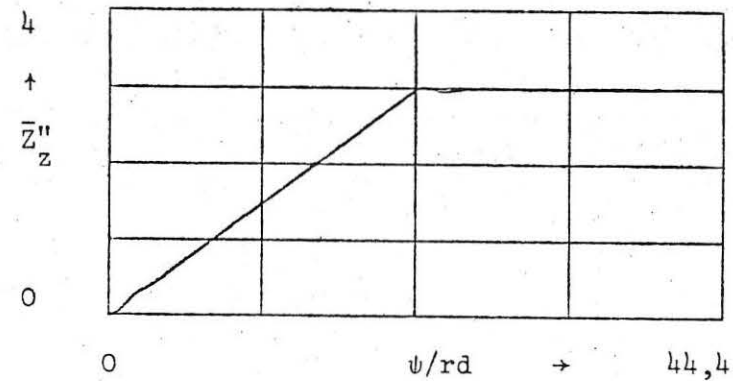


Bild 2.2.8 Zellenbeschleunigung \bar{z}''_z

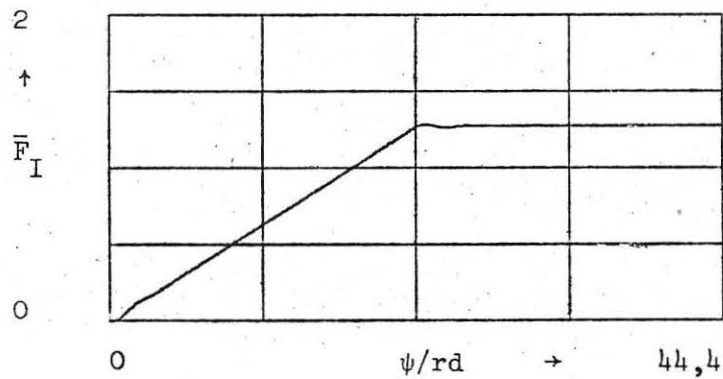


Bild 2.2.7 Isolatorkraft \bar{F}_I

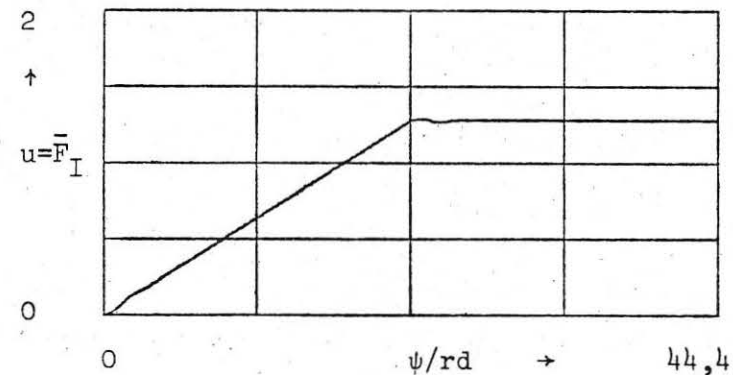


Bild 2.2.9 Steuergröße $u = \bar{F}_I$

bei Rückführung von Relativauslenkung $\Delta \bar{z}$ und ihrer Ableitung $\Delta \bar{z}'$

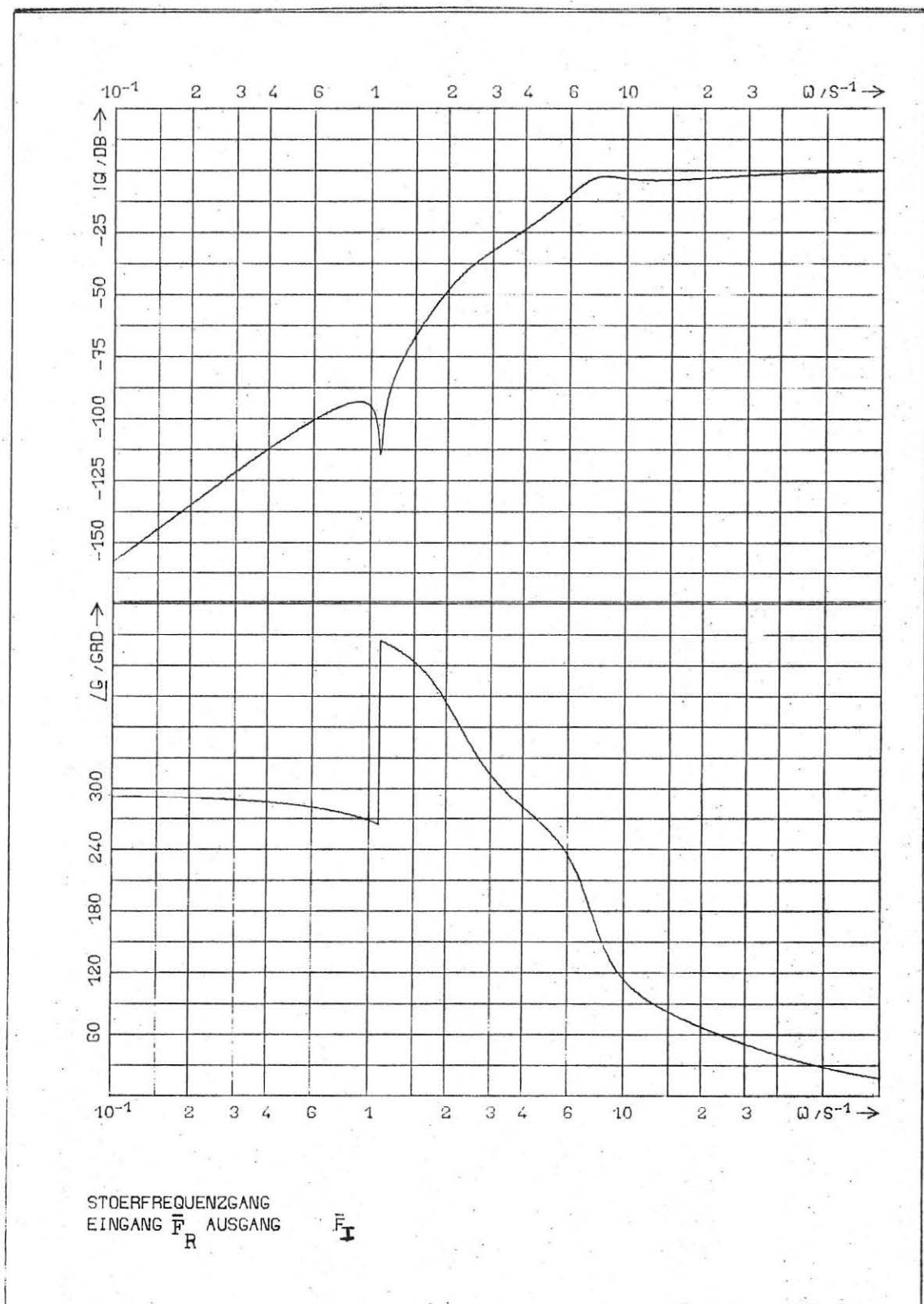


Bild 2.2.10 Störfrequenzgang $|\bar{F}_S^*(j\omega)| = \left| \frac{F_I(j\omega)}{\bar{F}_R(j\omega)} \right|$

bei Rückführung von Relativauslenkung und ihrer Ableitung

Die Eigenwerte des Gesamtsystems sind:

Realteile: - 26,6610

- 1,4973

- 1,4973

- 2,3920

- 2,3920

- 0,7589

- 0,7589

Imaginärteile: 0

7,2867

- 7,2867

1,0964

- 1,0964

2,0777

- 2,0777

3. Reglerentwurf für ein 2-Massen-System mit elastischer Zelle

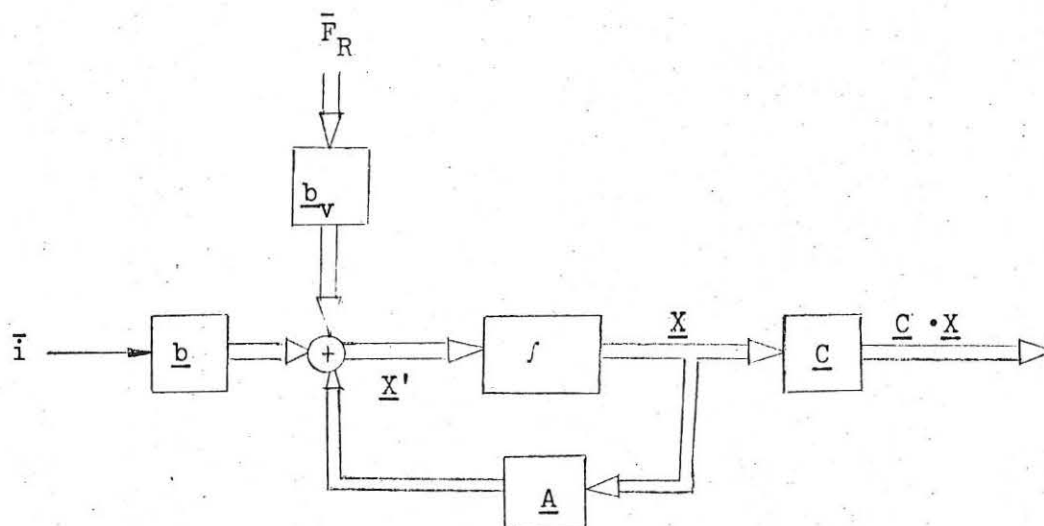
3.1 2-Massensystem mit elastischer Zelle und Steuergröße $u = \bar{i}$

Das im Abschnitt 1.1 ausgeführte Gleichungssystem ("schnelle" Ventil/Aktuatordynamik mit elastischer Zelle) wurde zur Kompensation von Lastvielfachen um ein Integrator und zur Tilgung der 4Ω - und 8Ω -Vibrationen um Notch-Filter erweitert.

3.1.1 Reglerentwurf bei Rückführung von Relativauslenkung $\Delta\bar{z}$ und Aktuator-druckdifferenz $\Delta\bar{p}$

Es wurde ein Riccati-Regler entworfen, mit einer konstanten Rückführung der

- Strecken-Zustandsgröße $(\Delta\bar{z}, \Delta\bar{p})$
- Integrator-Zustandsgröße (n_o)
- Notch-Filter-Zustandsgröße $(n_4, n_4' \text{ und } n_8, n_8')$



Dynamik des Gesamtsystems:

$$\begin{aligned} \underline{X}' &= \underline{A} \cdot \underline{X} + \underline{b} \cdot \bar{i} + \underline{b}_v \cdot \bar{F}_R \\ \underline{Y} &= \underline{C} \cdot \underline{X} \end{aligned}$$

Als Eingangsgröße in die Notch-Filter bleibt die Isolatorkraft \bar{F}_I erhalten.

Gemessen werden die Relativauslenkung $\Delta\bar{z}$ und die Aktuatordruckdifferenz $\Delta\bar{p}$, wobei die Isolatorkraft \bar{F}_I genotcht wird.

Die Dynamik des geschlossenen Systems lautet:

$$\underline{\dot{X}}' = \begin{bmatrix} \underline{A}_S & & & & & & & & & & & & & & & \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \bar{d}_\Delta & & & & & & & & & & & & & & & 0 & 1 \\ \bar{k}_\Delta & & & & & & & & & & & & & & & -\omega_{s4}^2 & 0 \\ \bar{d}_\Delta & & & & & & & & & & & & & & & 0 & 1 \\ \bar{k}_\Delta & & & & & & & & & & & & & & & -\omega_{s8}^2 & 0 \end{bmatrix} \cdot \underline{X}$$

$$+ \begin{bmatrix} \underline{b}_s \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \cdot \bar{i} + \begin{bmatrix} \underline{b}_{vs} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \bar{F}_R$$

in Kurzform: $\underline{\dot{X}}' = \underline{A} \cdot \underline{X} + \underline{b} \cdot \bar{i} + \underline{b}_v \bar{F}_R$

$$\underline{X}^T = [\Delta\bar{z}, \eta_1, \eta_2, \eta_3, \eta_4, \Delta\bar{p}, \Delta\bar{z}', \eta_1', \eta_2', \eta_3', \eta_4', \Delta\bar{p}', n_0, n_4, n_4', n_8, n_8']$$

($\underline{A}_s, \underline{b}_s, \underline{b}_{vs}$ siehe Seite 15).

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0,34485 & 0 & 0 & 0 & 0 & -4,2709 & 0,02299 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\underline{Y}^T = [\Delta \bar{z}, \bar{F}_I]$$

Die Beschleunigung $\ddot{\bar{z}}_z = \frac{2\bar{\omega}_\Delta \zeta_\Delta}{1-M} \cdot \Delta \bar{z}' + \frac{\bar{\omega}_\Delta^2}{1-M} \cdot \Delta \bar{z} + \frac{\gamma}{1-M} \cdot \Delta \bar{p} + \frac{\delta}{M} \cdot \bar{F}_R$

$$+ \sum_i \phi_{z_i}(x) \cdot \eta''_{z_i}(t)$$

setzt sich zusammen aus dem Starrkörperanteil (C M-Bewegung)

und aus dem Anteil der elastischen Bewegung ($\sum_i \phi_{z_i}(x) \cdot \eta_{z_i}''(t)$)

worin $\phi_{z_i}(x) = i$ -te Modalformen der (isolierten) frei-frei Zelle

$$\eta_{z_i}(t) = i - te \quad \text{generalisierte Koordinate.}$$

Mit den Wichtungsmatrizen

Q =

0

10

100

100

40

40

$$R = 100$$

Resultiert folgender Rückführvektor:

$$\underline{r}^T = \begin{bmatrix} -0,371 & 0 & 0 & 0 & 0 & -0,247 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -0,31623 & 3,68 \\ 0,465 & 4,192 \end{bmatrix}$$

Für diese Zustandsrückführung demonstrieren die Bilder 3.1.2 bis 3.1.5 das Einschwingungsverhalten des Systems beim Einwirken der Vibrationsstörkraft \bar{F}_R nach Bild 7 und die Bilder 3.1.6 bis 3.1.9 das Verhalten des Systems beim Einwirken der Zusatzkraft infolge eines Zusatzlastvielfachen $\Delta n = 1,5$ nach Bild 8.

Die Eigenwerte dieses geschlossenen Systems sind.

Realteile:	- 7,7275	Imaginärteile:	26,2521
	- 7,7275	-	26,2521
	- 5,0363		8,5778
	- 5,0363	-	8,5778
	- 1,3227		7,4471
	- 1,3227	-	7,4471
	- 3,5371		3,3985
	- 3,5371	-	3,3985
	- 0,0568		5,6844
	- 0,0568	-	5,6844
	- 0,0320		4,2308
	- 0,0320	-	4,2308
	- 1,1820		2,5057
	- 1,1820	-	2,5057
	- 1,1313		0
	- 0,0110		1,122
	- 0,0110	-	1,120

Regler-Konfiguration:

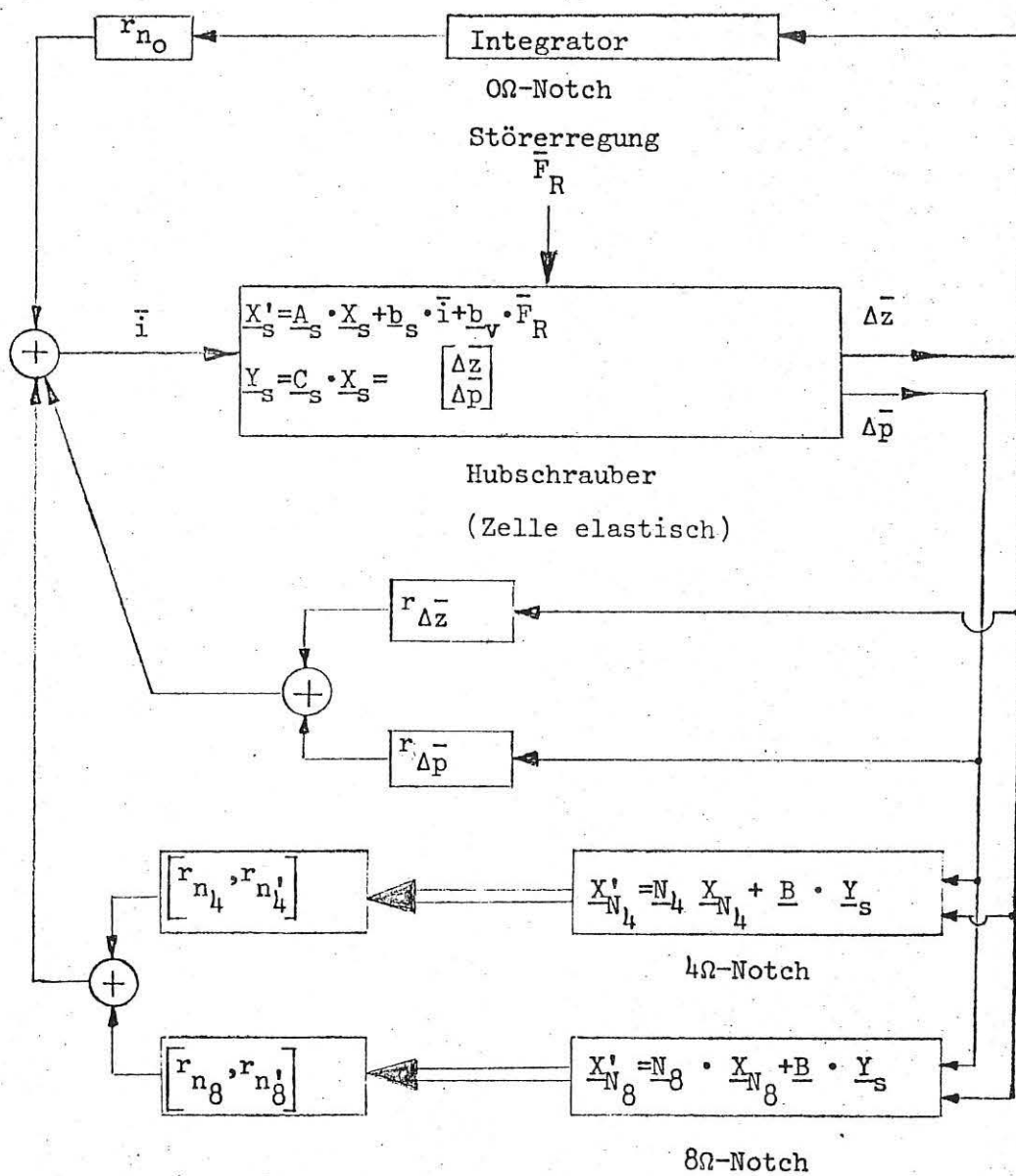


Bild 3.1.1 Reglerkonfiguration bei Messung der Relativauslenkung und Aktuatordruckdifferenz.

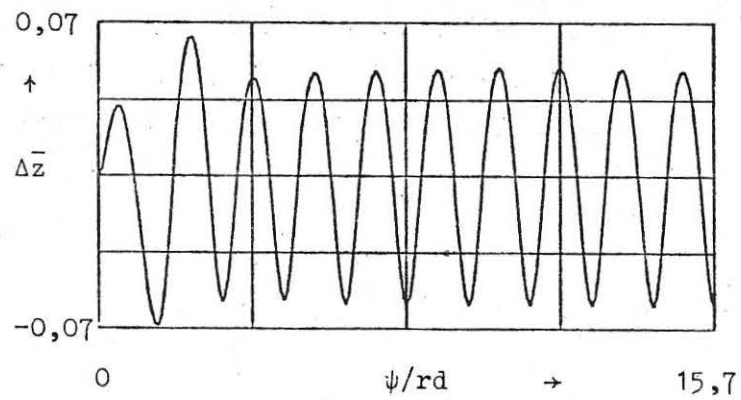


Bild 3.1.2: Relativauslenkung

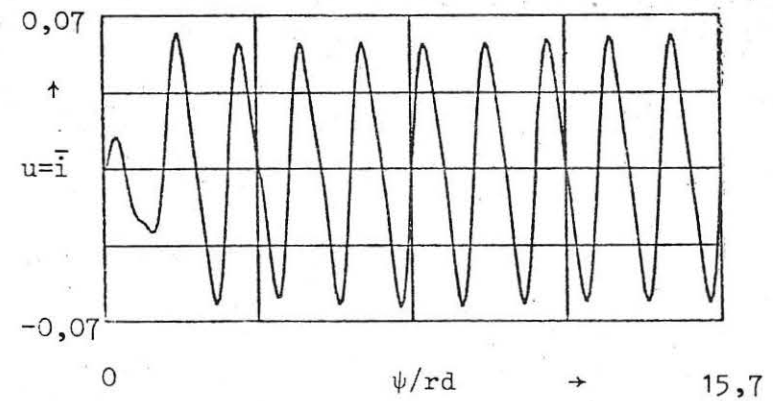


Bild 3.1.4: Ventilsteuerstrom

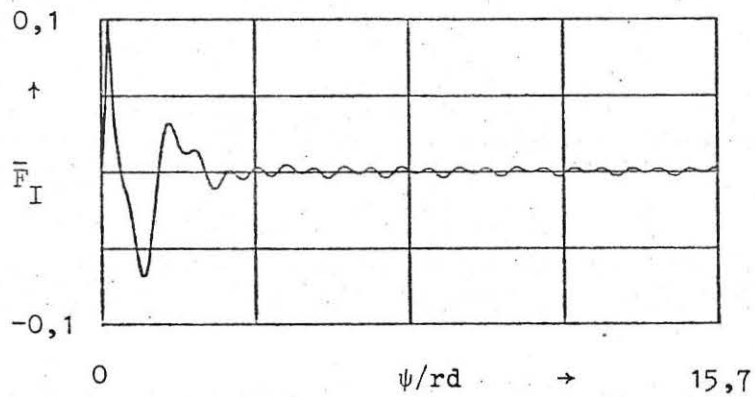


Bild 3.1.3: Isolatorkraft

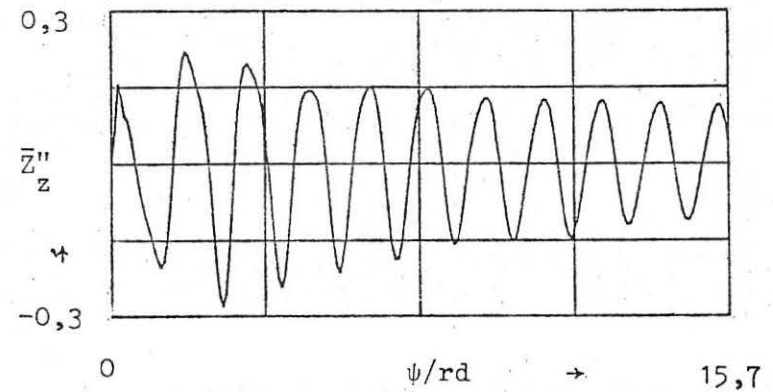


Bild 3.1.5: Zellenbeschleunigung

bei Rückführung von Relativauslenkung und Aktuatordruckdifferenz

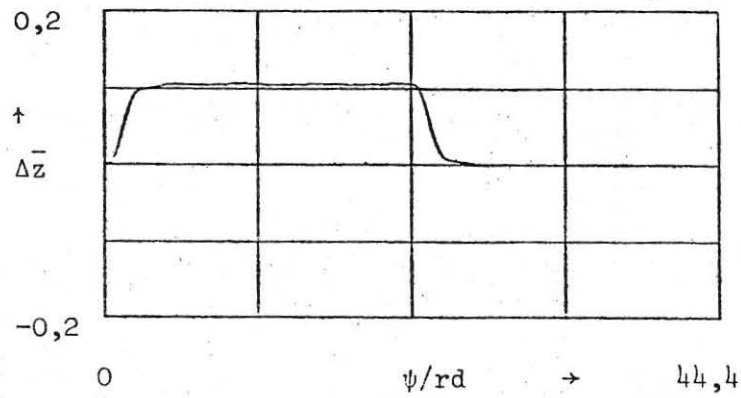


Bild 3.1.6: Relativauslenkung

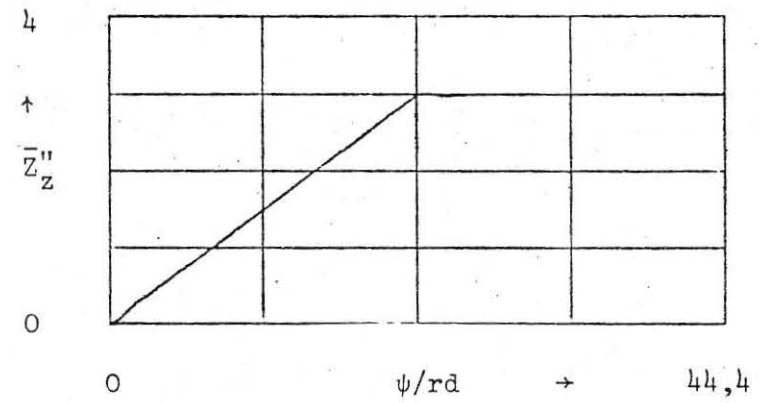


Bild 3.1.8: Zellenbeschleunigung

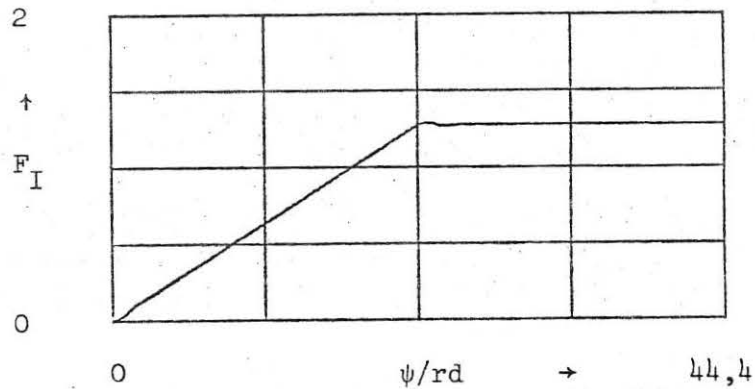


Bild 3.1.7: Isolatorkraft

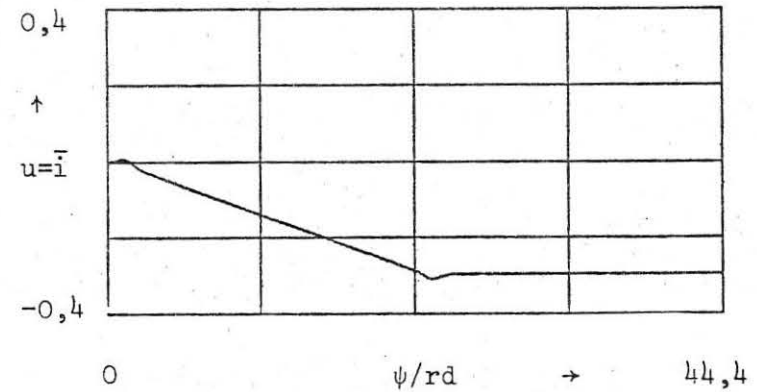


Bild 3.1.9: Ventilsteuerstrom

bei Rückführung von Relativauslenkung und Aktuatordruckdifferenz

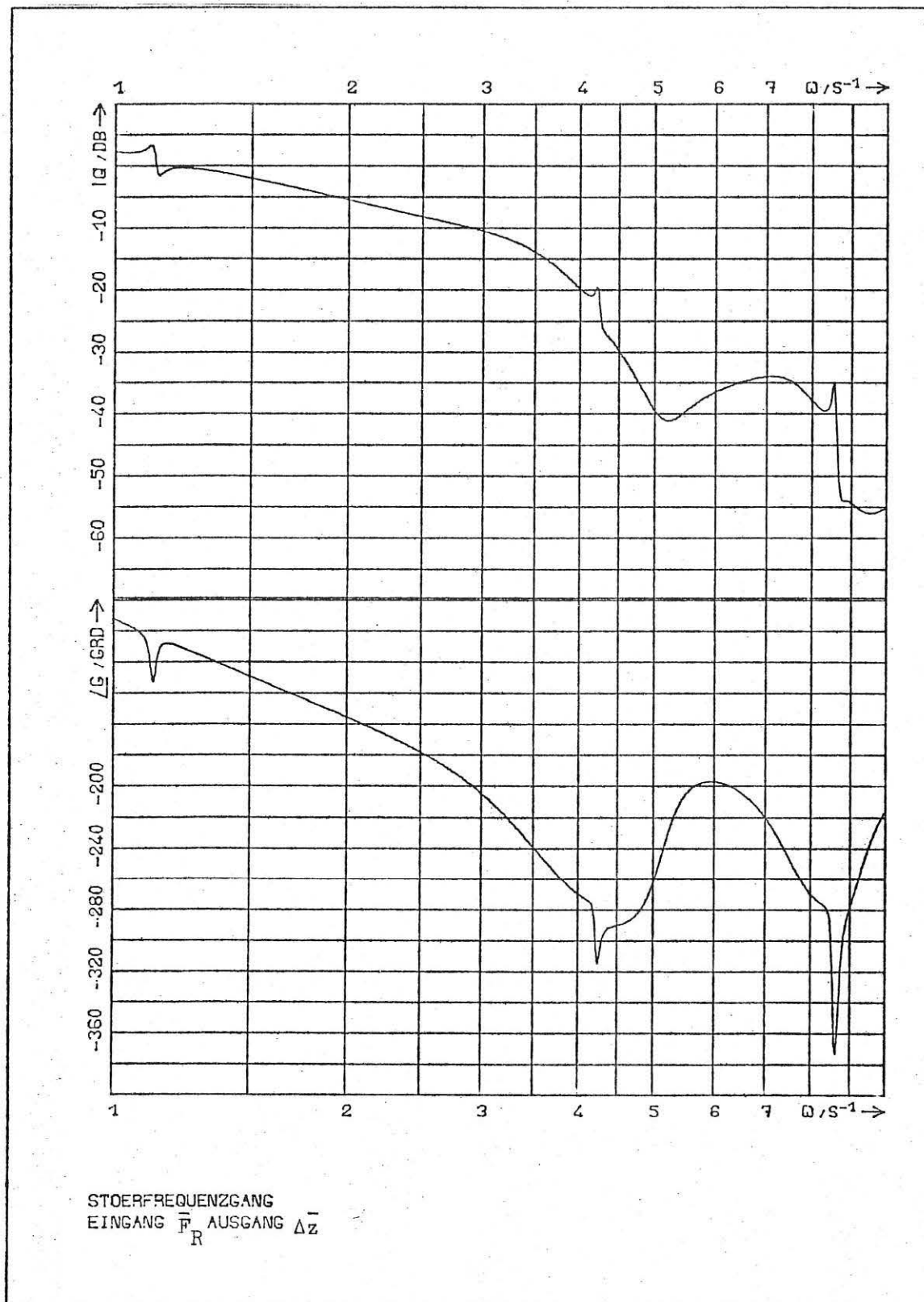


Bild 3.1.10: Störfrequenzgang $|F_s^*(j\omega)| = \left| \frac{\bar{F}_I(j\omega)}{\bar{F}_R(j\omega)} \right|$

bei Rückführung von Relativauslenkung und Aktuatordruckdifferenz.

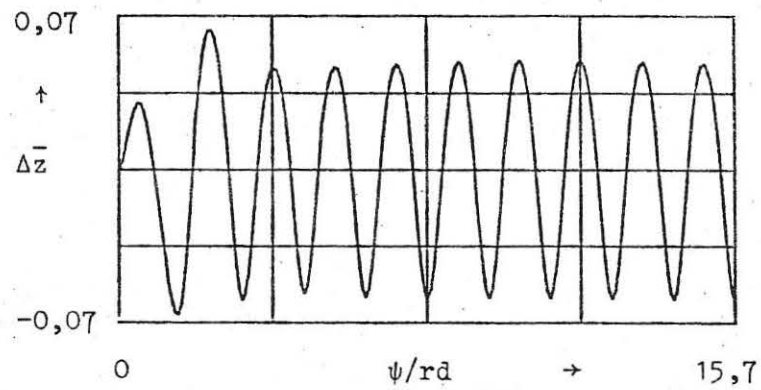


Bild 3.1.11: Relativauslenkung

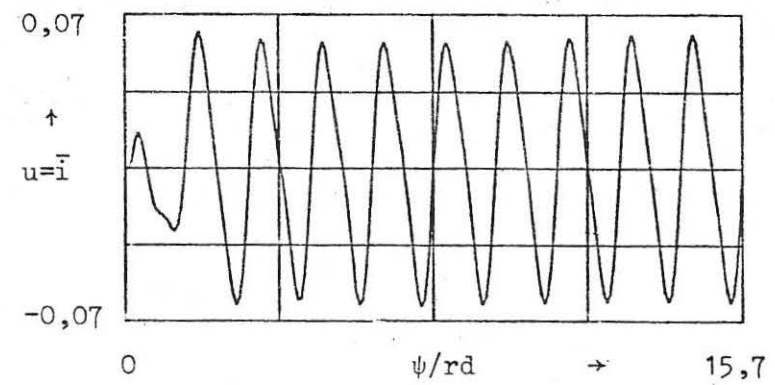


Bild 3.1.13: Ventilsteuerstrom

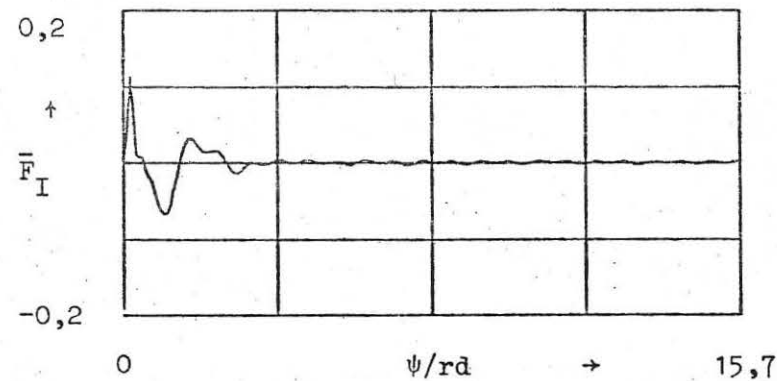


Bild 3.1.12: Isolatorkraft

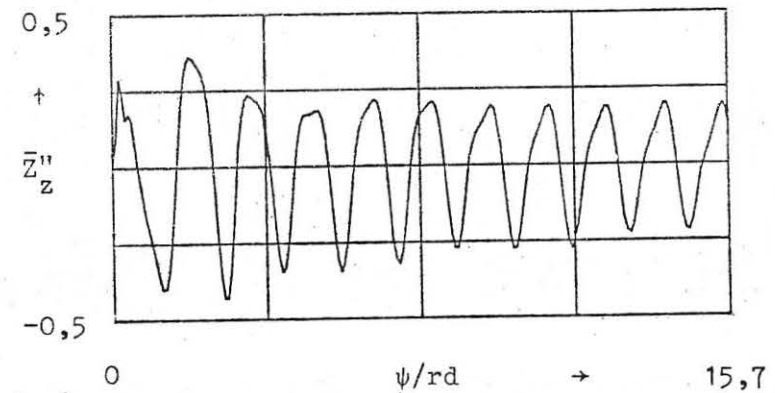


Bild 3.1.14: Zellenbeschleunigung

bei alleiniger Rückführung der Relativauslenkung

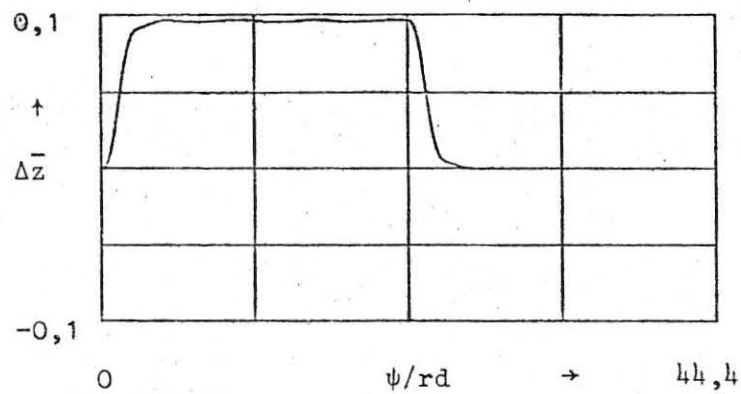


Bild 3.1.15: Relativauslenkung

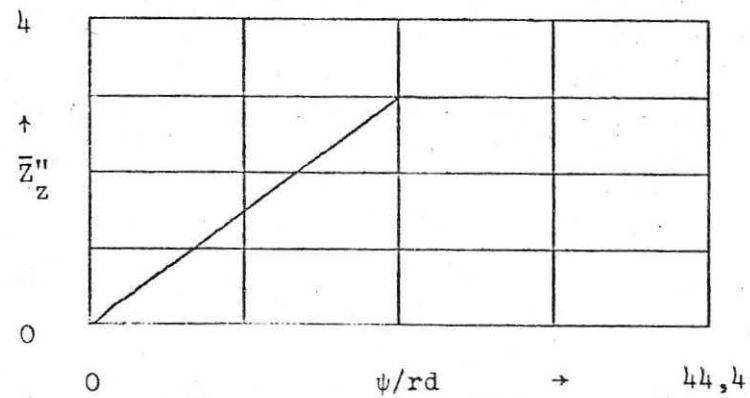


Bild 3.1.17: Zellenbeschleunigung

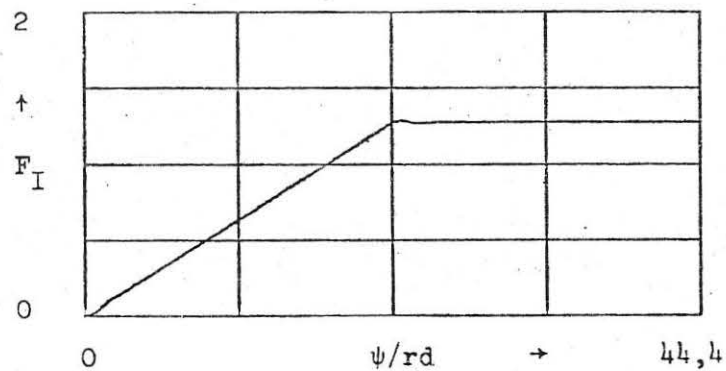


Bild 3.1.16: Isolatorkraft

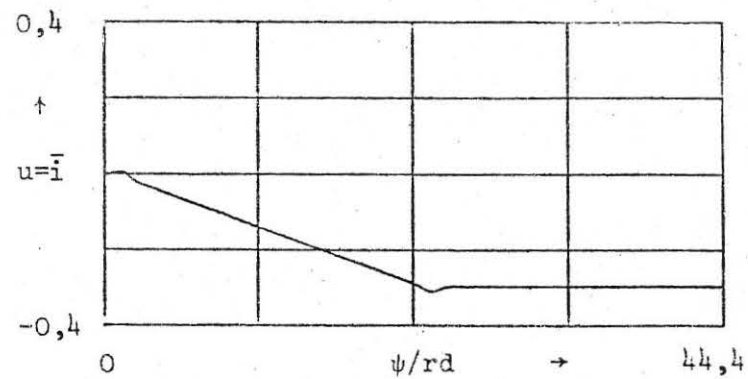


Bild 3.1.18: Ventilsteuerstrom

bei alleiniger Rückführung der Relativauslenkung

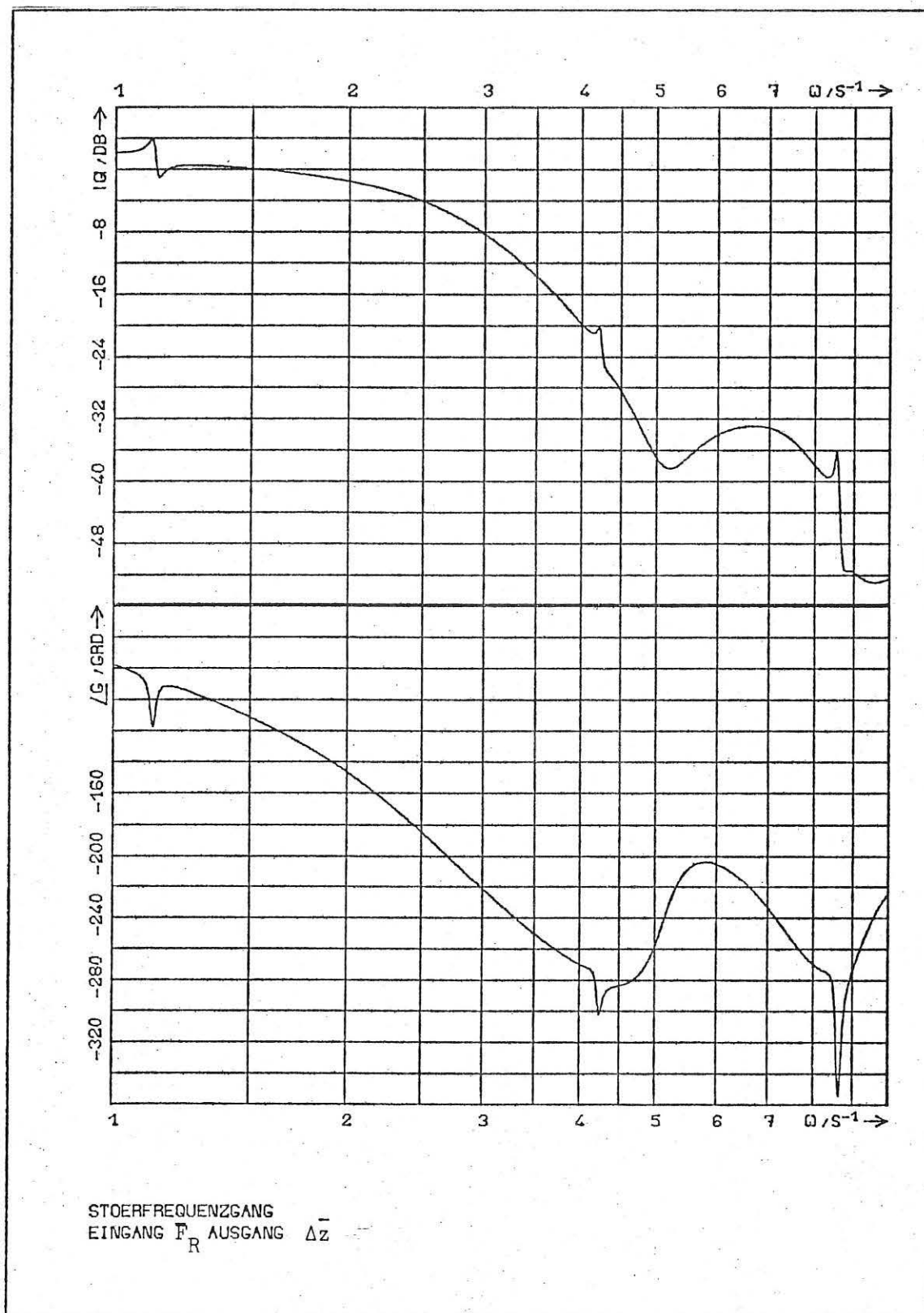


Bild 3.1.19: Störfrequenzgang $|F_s^*(j\omega)| = \left| \frac{\bar{F}_I(j\omega)}{\bar{F}_R(j\omega)} \right|$

bei alleiniger Rückführung der Relativauslenkung.

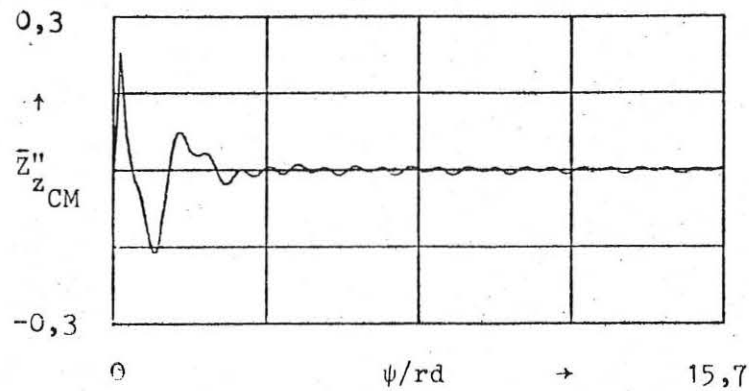


Bild 3.1.20: Zellenbeschleunigung (starrkörperanteil) bei Rückführung der Relativauslenkung und Aktuatorendruckdifferenz.

3.2 2-Massen-System, Zelle elastisch und Steuergröße $u = \bar{F}_I$

Die Dynamikgleichung wurde aus [1] entnommen

$$\underline{\dot{x}}_0' = \underline{A}_0 \cdot \underline{x}_0 + \underline{b}_0 \cdot \bar{F}_I + \underline{b}_{v_0}' \cdot \bar{F}_R \quad (\text{in Kurzform}) \quad (1.3.2)$$

Der Zustandsvektor $\underline{x}_0^T = [\Delta \bar{z} \quad n_1 \quad n_2 \quad n_3 \quad n_4 \quad \Delta \bar{z}' \quad n_1' \quad n_2' \quad n_3' \quad n_4']$

enthält als Komponenten die normierte Relativauslenkung $\Delta \bar{z}$, die generalisierten Modalkoordinaten, sowie deren Ableitungen nach dem Rotordrehwinkel ψ .

Steuergröße ist die normierte Isolatorkraft \bar{F}_I und Störgröße die auf die Rotor-Getriebe-Einheit einwirkende Kraft $\bar{F}_R = 0,129078 (\cos 4 \psi + 0,4 \cos 8 \psi)$ bzw. die einwirkende Zusatzkraft beim Abfangen (harte Rampe, $\Delta n = 1,5$).

3.2.1 Reglerentwurf

Es wurde ein Riccati-Regler entworfen, der eine konstante Rückführung der

- Strecken-Zustandsgrößen $(\Delta \bar{z}, \Delta \bar{z}')$
- Integrator-Zustandsgröße (n_0)
- Notch-Filter-Zustandsgrößen $(n_4, n_4' \text{ und } n_8, n_8')$

hat.

Die in dem quadratischen Integralkriterium

$$(J = \int_0^{\infty} (\underline{X}^T \cdot \underline{Q} \underline{X} + \underline{u}^T \underline{R} \cdot \underline{u}) d\psi)$$

enthaltenen Wichtungsmatrizen wurden varriert um das Schwingungsverhalten des Systems mit Reglereinwirkung den gestellten Anforderungen anzupassen.

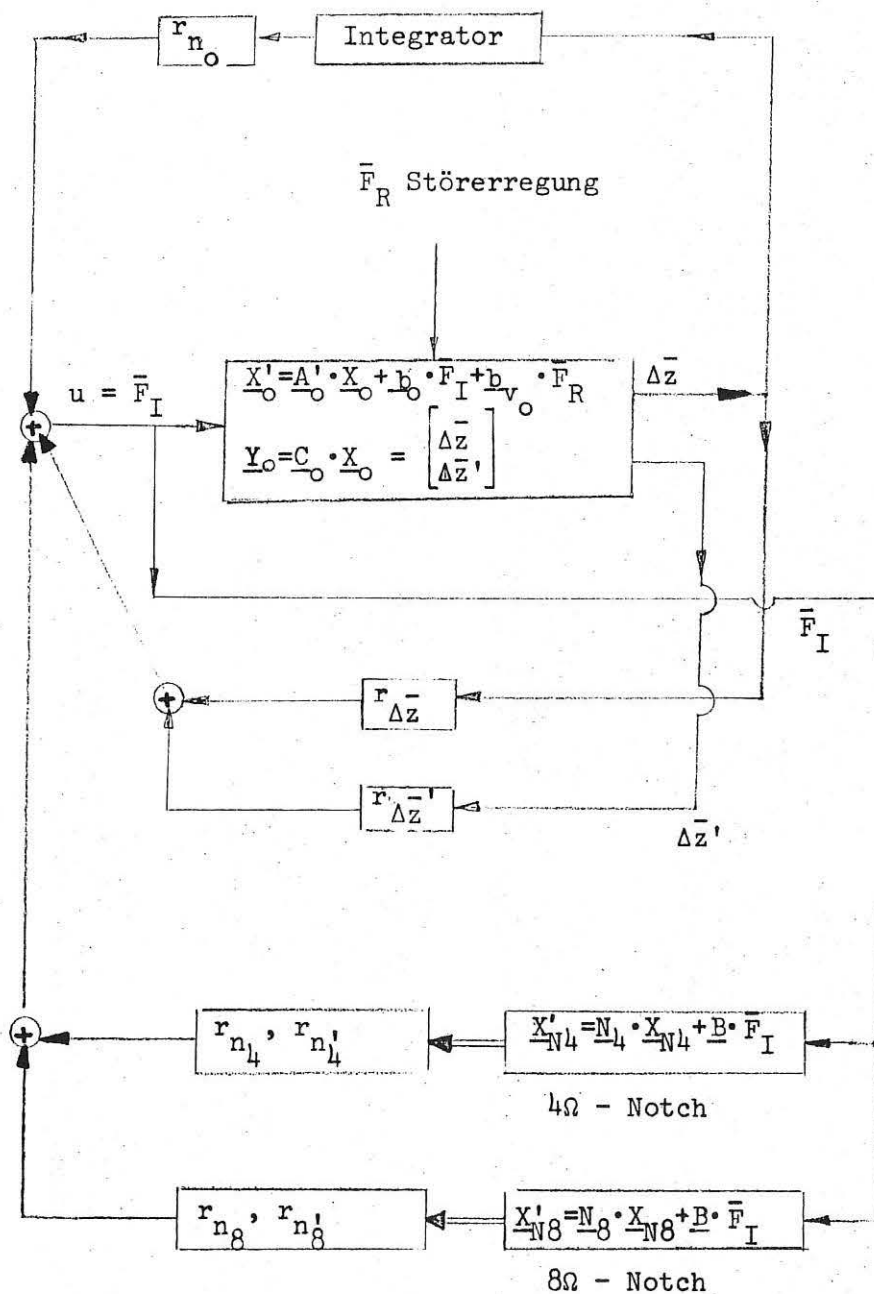


Bild 3.2.1 Reglerkonfiguration bei Messung von $\Delta \bar{z}$ und $\Delta \bar{z}'$.

$$\begin{bmatrix}
 \Delta \bar{z} \\
 n_1 \\
 n_2 \\
 n_3 \\
 n_4 \\
 \Delta \bar{z}' \\
 n_1' \\
 n_2' \\
 n_3' \\
 n_4' \\
 n_0 \\
 n_4' \\
 n_8 \\
 n_8'
 \end{bmatrix}
 =
 \begin{bmatrix}
 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 -130,75 & 2315,2 & -19695 & 5403,3 & 0,00001 & -2,6259 & 14,447 & -36,78 & 4,6823 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 -0,99173 & 0 & 0 & 0 & 0 & -0,019917 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & -15,189 & 0 & 0 & 0 & 0 & -0,077943 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & -114,69 & 0 & 0 & 0 & 0 & -0,21419 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & -532,66 & 0 & 0 & 0 & 0 & -0,46159 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0,000001 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -15 & 0,000001 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -64 & 0,000001
 \end{bmatrix}
 \cdot
 \begin{bmatrix}
 \Delta \bar{z} \\
 n_1 \\
 n_2 \\
 n_3 \\
 n_4 \\
 \Delta \bar{z}' \\
 n_1' \\
 n_2' \\
 n_3' \\
 n_4' \\
 n_0 \\
 n_4' \\
 n_8 \\
 n_8'
 \end{bmatrix}
 +
 \begin{bmatrix}
 0 \\
 0 \\
 0 \\
 0 \\
 0 \\
 -20,406 \\
 -0,015498 \\
 0,012484 \\
 -0,0034418 \\
 0,00068425 \\
 0 \\
 0 \\
 2,3462 \\
 2,3462
 \end{bmatrix}
 \cdot \bar{F}_I
 +
 \begin{bmatrix}
 0 \\
 0 \\
 0 \\
 0 \\
 0 \\
 13,104 \\
 0 \\
 0 \\
 0 \\
 0 \\
 0 \\
 0 \\
 0 \\
 0
 \end{bmatrix}
 \cdot \bar{F}_R$$

$$\underline{X}' = \underline{A} \cdot \underline{X} + \underline{b} \cdot \bar{F}_I + \underline{b}_v \cdot \bar{F}_R$$

$$\underline{Y} = \underline{C} \cdot \underline{X} + \underline{d} \cdot \bar{F}_I$$

mit

$$\underline{C} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 130,75 & -2815,2 & 19695 & -5403,3 & 0 & 2,6259 & -14,447 & 36,78 & -4,6823 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\underline{d} = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 7,3029 \end{bmatrix}$$

$$\underline{Y} = \begin{bmatrix} \Delta \bar{z} \\ \bar{F}_I \\ \bar{z}''_z \end{bmatrix}$$

Mit den Wichtungsmatrizen

$$\underline{Q} = \begin{bmatrix} \bigcirc & & & & \\ & 10 & 0 & 0 & 0 \\ & 0 & 100 & 0 & 0 \\ & 0 & 0 & 100 & 0 \\ & 0 & 0 & 0 & 40 \\ & 0 & 0 & 0 & 0 & 40 \end{bmatrix}$$

$$R = 125$$

resultiert folgender Rückführvektor:

$$\underline{r}^T = [0,3699 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0,24094 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0,2828 \ -2,5663 \ -0,6621 \ -3,10811 \ -0,4172]$$

Für diese Zustandsrückführung, für das System (Gleichung 2.3.2) demonstrieren die Bilder 3.2.2 bis 3.2.5 das Einschwingungsverhalten des Systems beim Einwirken der Vibrationsstörkraft \bar{F}_R nach Bild 7 und die Bilder 3.2.6 bis 3.2.9 das Verhalten des Systems beim Einwirken der Zusatzkraft infolge eines Zusatzlastvielfachen $\Delta n = 1,5$ nach Bild 8.

Die Eigenwerte des Gesamtsystems sind:

Realteile:	- 0,2316	Imaginärteile:	23,0780
	- 0,2316		- 23,0780
	- 0,1563		10,0665
	- 0,1563		- 10,0665
	- 0,6090		7,9259
	- 0,6090		- 7,9259
	- 1,3963		3,5890
	- 1,3963		- 3,5809
	- 1,6542		0
	- 0,8489		1,6240
	- 0,8489		- 1,6240
	- 0,0029		0,92136
	- 0,0029		- 0,92136
	- 0,0393		3,9210
	- 0,0393		- 3,9210

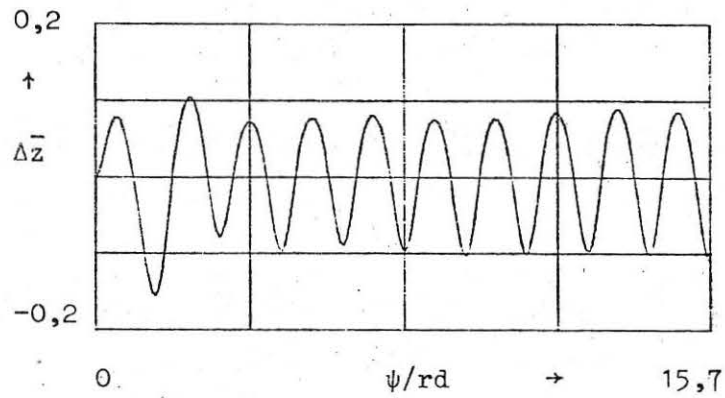


Bild 3.2.2 Relative Auslenkung $\Delta \bar{z}$

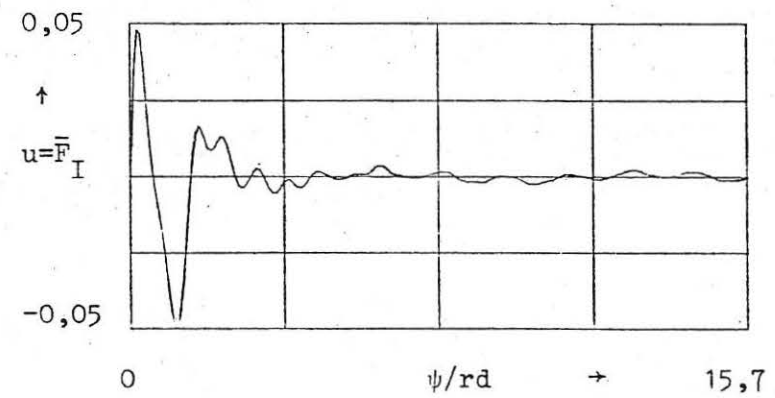


Bild 3.2.4 Steuergröße $u = \bar{F}_I$

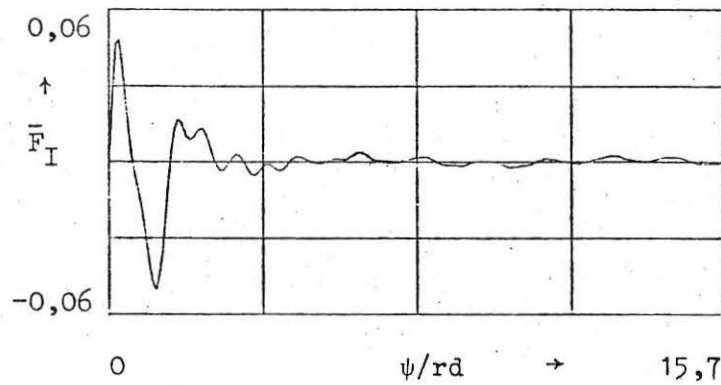


Bild 3.2.3 Isolatorkraft \bar{F}_I

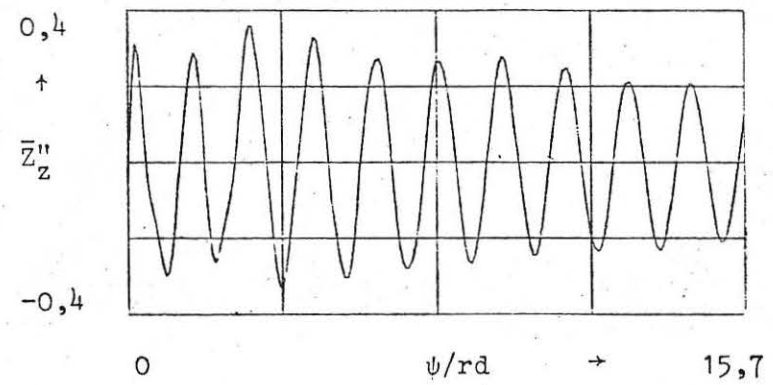


Bild 3.2.5 Zellenbeschleunigung \bar{z}''_z

bei Rückführung von Relativauslenkung $\Delta \bar{z}$ und ihrer Ableitung $\Delta \bar{z}'$

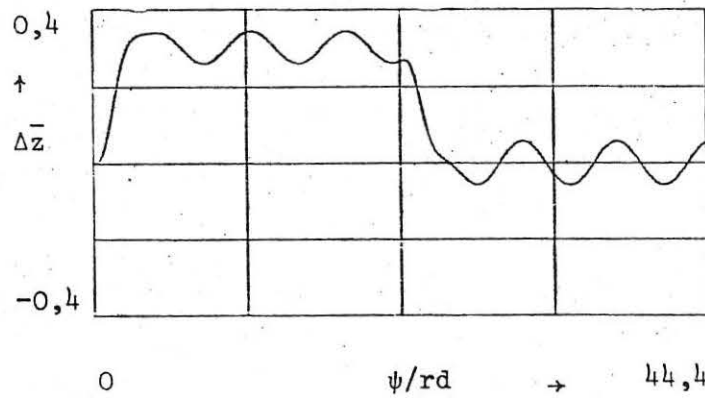


Bild 3.2.6 Relativauslenkung $\Delta \bar{z}$

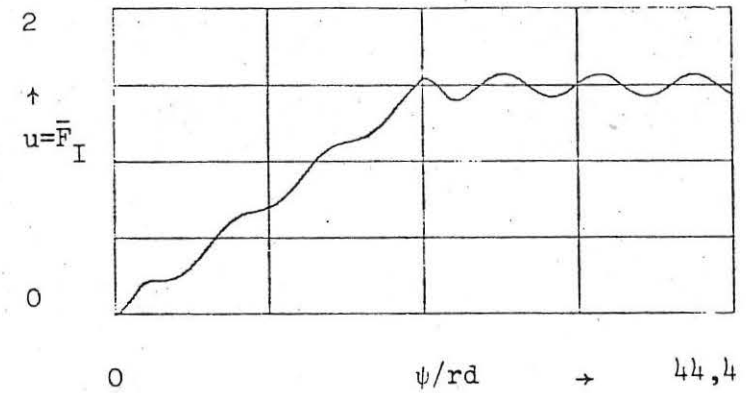


Bild 3.2.8 Steuergröße $u = \bar{F}_I$

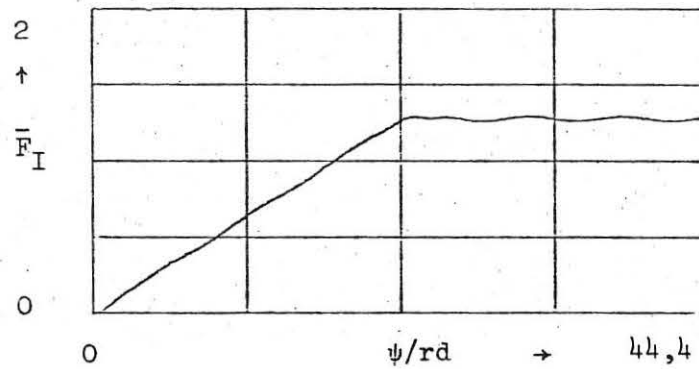


Bild 3.2.7 Isolatorkraft \bar{F}_I

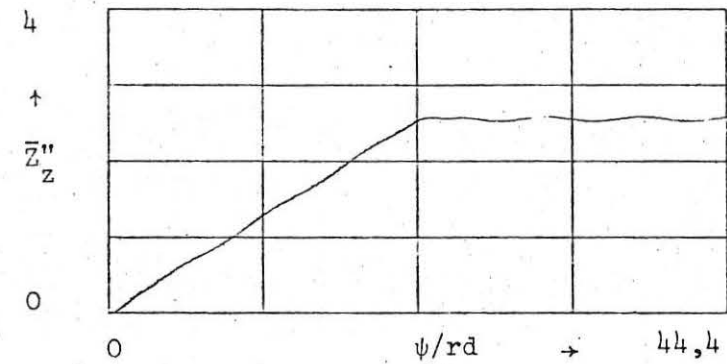


Bild 3.2.9 Zellenbeschleunigung \bar{z}''_z

bei Rückführung von Relativauslenkung $\Delta \bar{z}$ und ihrer Ableitung $\Delta \bar{z}'$

4. Vergleich der Reglerentwürfe

Zur Erfüllung der Entwurfskriterien (siehe Abschnitt 1.3) wurde eine spezielle Reglerstruktur mit Notch-Filter und Integratoren entworfen, welche zu einer konstanten Ausgangsvektorrückführung führen.

Als Eingangsgröße in die Notch-Glieder ist die von Stellsystem ausgeübte Isolatorkraft \bar{F}_I benutzt worden.

Diese uni-direktionale Rückführung bewirkt eine Unterdrückung der Rotor-Erregung auf die Zelle, nicht aber der Zellen-Vibrationen selbst.

Mit der (theoretisch) unendlichen Verstärkung der "Notchelemente" bei den Störfrequenzen 4Ω und 8Ω werden in der Störübertragungsfunktion bei diesen Frequenzen im Zählerpolynom (theoretisch) Nullstellen erzwungen.

Die Relativauslenkung wurde über einen Integrator zurückgeführt, so daß sie im stationären Fall auf Null zurück geht.

Für das starre 2-Massen-System wurde auf Grund der einfachen Beziehung

$$\bar{z}_z'' = \bar{b}_A = \frac{\bar{F}_I}{m} \quad \text{eine Beschleunigungsrückführung vorgenommen (siehe Anhang).}$$

Es wurde der Versuch unternommen diese bi-direktionale Rückführung auf das 2-Massen-System mit elastischer Zelle anzuwenden.

Da aber die Zellenbeschleunigung aus den starrkörperanteil und dem Anteil der elastischen Bewegung resultiert ($\bar{z}_z'' = \bar{z}_{CM}'' + \sum_i \phi_{z_i}(x) \eta_{z_i}''(t)$), wurde das System instabil. (Bei Beibehaltung einer konstanten Ausgangsvektorrückführung).

Der entworfene Regler für die "schnelle" Ventil-Aktuatordynamik (Zustandsgrößen: $\bar{\epsilon}$, $\bar{\epsilon}'$, $\Delta\bar{p}$) hat ein stabiles Verhalten.

Die Auslenkungen der interessierenden Zustandsgrößen $\Delta\bar{z}$ und $\Delta\bar{p}$ sind unterhalb der vorgeschriebenen Schranken geblieben.

Die Isolatorkraft \bar{F}_I (und die Zellenbeschleunigung \bar{z}_z'') geht im eingeschwungenen Zustand gegen Null.

(Bilder 2.1.3, 3.1.3 und 3.1.5).

Die Relativauslenkung $\Delta\bar{z}$ geht ebenfalls im stationären Zustand gegen Null und beweist damit die guten Trimmeigenschaften des Reglers. (Bilder 2.1.6 und 3.1.6).

Der entworfene Regler für die "langsame" Relativbewegung der Rotor-Getriebe-Masse (Zustandsgrößen: $\Delta \bar{z}$, $\Delta \bar{z}'$) erfüllt ebenfalls die Entwurfsbedingungen. Außerdem wurde durch das schnelle Abklingen der Isolator-Kraft ein gutes Einschwingungsverhalten bestätigt.

(Bilder 2.2.3, 2.2.6, 3.2.3, 3.2.5 und 3.2.6.)

Ein Vergleich zwischen der Regler "schnelle" Ventil-Aktuatordynamik und "langsame" Relativbewegung der Rotor-Getriebe-Einheit zeigt, daß das Einschwingen der Isolator-Kraft F_I in etwa $\psi = 7 \text{ rad}$ erfolgt.

Der Einfluß der Strukturelastizität ist aus den Bildern 3.1.5, 3.1.14, und 3.2.5 ersichtlich.

Die Zellenbeschleunigung klingt relativ langsam ab, (allein infolge der inneren Strukturdämpfung).

5. Zusammenfassung

In diesem Bericht wurde ein System zur aktiven Rotorisolation (Anhand der blattzahlharmonischen Frequenzen $N\Omega$, $2N\Omega$... eines Vierblattrotors) untersucht, welches die folgenden zwei Aufgaben leistet:

- Kompensation blattzahlharmonischer Rotorerregungen und
- Begrenzung der statischen Relativbewegungen der Rotor-Getriebe-Einheit.

Für die so entworfenen Regler bleibt die Zelle über den Kraftisolator starr mit der Antriebseinheit verbunden, wobei die "Notchelemente" den Kraftisolator ansteuern.

Geregelt wird dabei durch Rückführung derjenigen Größen, die von äußeren Störeinflüssen befreit werden sollen.

In die jeweilige Rückführung wird ein "Notch-Element" eingebaut, welches ein Modell desjenigen Systems darstellt, welches die äußeren Störungen erzeugt.

Es wurde in der Rückführung die Isolatorkraft \bar{F}_I (Ursache) und nicht die Isolatoranschlußbeschleunigung \bar{z}_{z_I}'' (Wirkung) benutzt.

Damit wurde eine aktive Unterdrückung der Zellen-Erregung durch Kompensation der Rotorstörerregung und nicht etwa eine aktive Unterdrückung der Zellen-Response durch Regelung der Zellenschwingsformen erzielt.

Die Berechnung der Rückführkoeffizienten erfolgte mit modifizierten Riccati-Entwürfen, wobei im Gütekriterium eine vereinfachte Gewichtsmatrix verwendet wurde.

6. Schrifttum

- [1] Obermeier, M., Aufstellen der Systemgleichungen für das ASIS-Funktionsmodell in Verbindung mit regelungstechnischen Untersuchungen.
Technischer Bericht der Firma MBB, TN-DE 122-5/77, (26.7.1977)
- [2] Strehlow, H., Daten für das elastische Modell (NASIS 5)
- [3] Schulz, G., Konzepte zur Auslegung eines vollaktiven Hubschrauber-Schwingungsisolations-system mittels Ausgangsvektorrückführung.
DFVLR-Interner Bericht B 552-76/12, 1976
- [4] Schulz, G.,
Kreisselmeier, G., Aktive Schwingungsisolierung bei einem Hubschrauber.
Beitrag zum VDI/VDE-Ansprachetag "Regelungssynthese im Zustandsraum", Frankfurt, (Februar 1977)
- [5] Schulz, G., Active Multivariable Vibration Isolation for an Helicopter Using Decoupling and Frequency Domain Methods.
IFAC world Congress Helsinki, (1978)
Preprints, pp 1251-1258
- [6] Strehlow, H.,
Hagemann, W., Theoretisches Konzept eines voll aktiven Hubschrauber-Schwingungsisolations-systems.
Technische Niederschrift, TN-D 123-18/75, Messerschmitt-Bölkow-Blohm GmbH.

Anhang

Reglerentwurf für das im Abschnitt 2.1 beschriebene starre 2-Massensystem mit der Rückführung von Relativauslenkung $\Delta \bar{z}$ und Aktuatoranschlußbeschleunigung \bar{b}_A .

Der Reglerentwurf (Riccati-Regler) wird für das folgende, um die Reglerdynamik erweiterte System durchgeführt, worin aufgrund der Gleichung $\bar{F}_I = \bar{m}_z \cdot \bar{z}''$, die Aktuatoranschlußbeschleunigung $\bar{b}_A = \bar{z}''_z$ (für starre Hubschraubermodelle), direkt "genotcht" wird.

Die Zustandsgleichung lautet:

$$\begin{bmatrix} \Delta \bar{z} \\ \Delta \bar{z}' \\ \bar{\epsilon} \\ \bar{\epsilon}' \\ \Delta \bar{p} \\ n_o \\ n_4 \\ n_4' \\ n_8 \\ n_8' \end{bmatrix}' = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ -9,4505 & -0,0334 & 0 & 0 & 41,071 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -801,5 & -28,311 & 0 \\ 0 & -64,684 & 967,94 & 0 & -32,292 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1,4355 & 0,00507 & 0 & 0 & -6,2385 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1,4355 & 0,00507 & 0 & 0 & -6,2385 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \bar{z} \\ \Delta \bar{z}' \\ \bar{\epsilon} \\ \bar{\epsilon}' \\ \Delta \bar{p} \\ n_o \\ n_4 \\ n_4' \\ n_8 \\ n_8' \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 205,6 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \bar{i} + \begin{bmatrix} 0 \\ 13,1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \bar{F}_R$$

In Kurzform $\underline{X}' = \underline{A} \cdot \underline{X} + \underline{b} \cdot \bar{i} + \underline{b}_v \cdot \bar{F}_R$

Regler-Konfiguration:

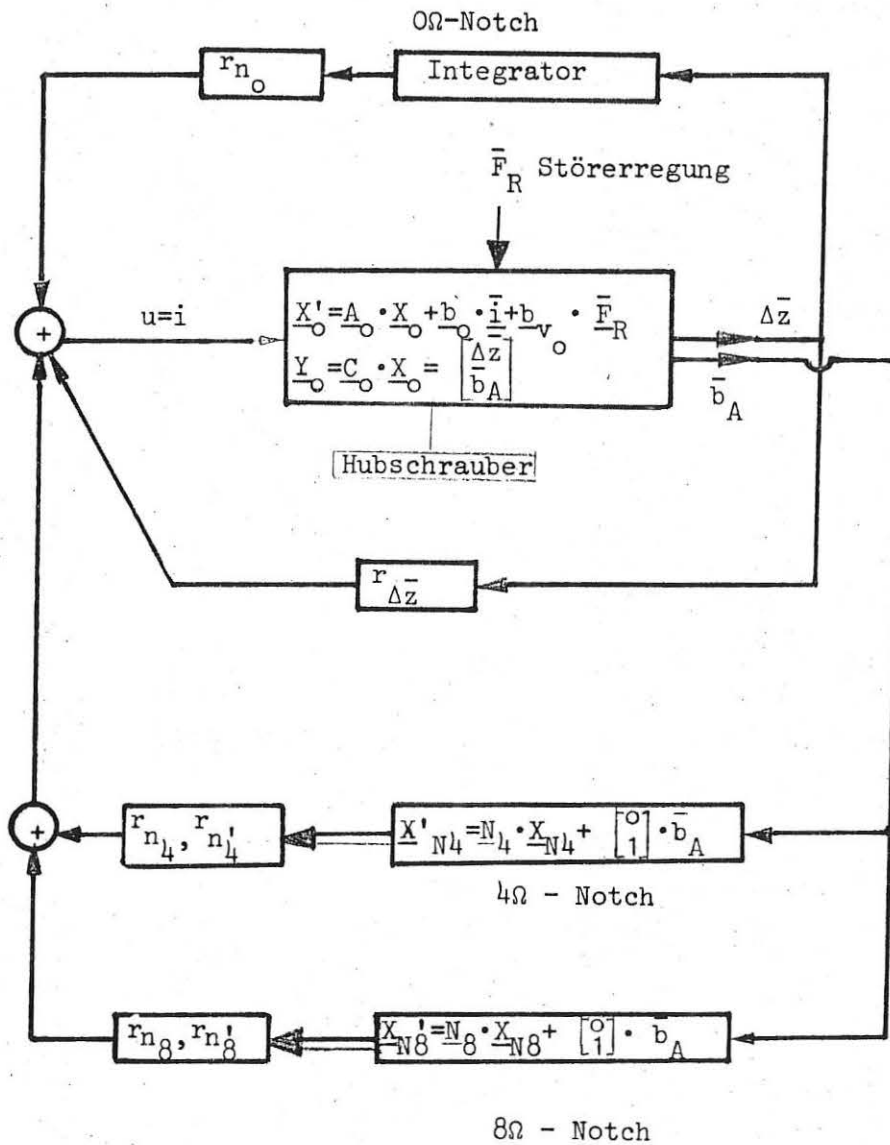


Bild A.1 Reglerkonfiguration bei Rückführung von Δz und \bar{b}_A .

$$\underline{Y} = \underline{C} \cdot \underline{X}$$

$$\underline{C} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1.43552 & 0.00507 & 0 & 0 & -6.2385 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ .00507 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ .00507 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Mit den Wichtungsmatrizen

$$\underline{Q} = \begin{bmatrix} \bigcirc & \\ & \begin{matrix} 10 & & & & \\ & 100 & & & \\ & & 100 & & \\ & & & 40 & \\ & & & & 40 \end{matrix} \end{bmatrix}$$

$$\underline{R} = 1$$

(Rückführvektor $\underline{r}^T = [-0,42983 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ -0,316228 \ 3,97351 \ 0,275238 \ 5,07408 \ 6,29588]$)

ist folgendes Einschwingungsverhalten des Systems erzielt:

Beim Einwirken der Vibrationsstörkraft \bar{F}_R nach Bild 7

Siehe Bilder A.2 bis A.5

Beim Einwirken der Zusatzkraft infolge eines Zusatzlastvielfachen $\Delta n=1,5$ nach Bild 8.

Siehe Bilder A.6 bis A.9

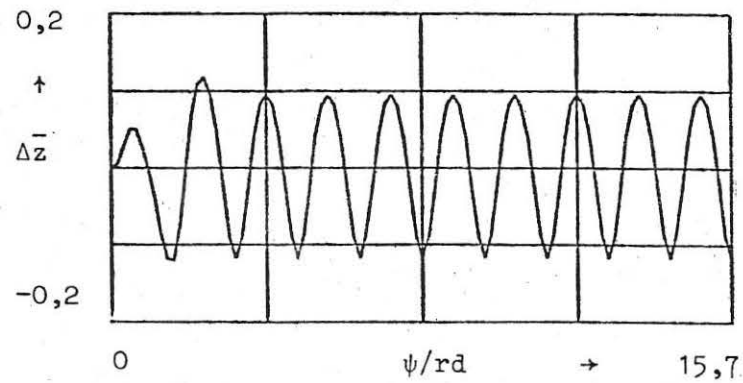


Bild A.2 Relativauslenkung $\Delta \bar{z}$

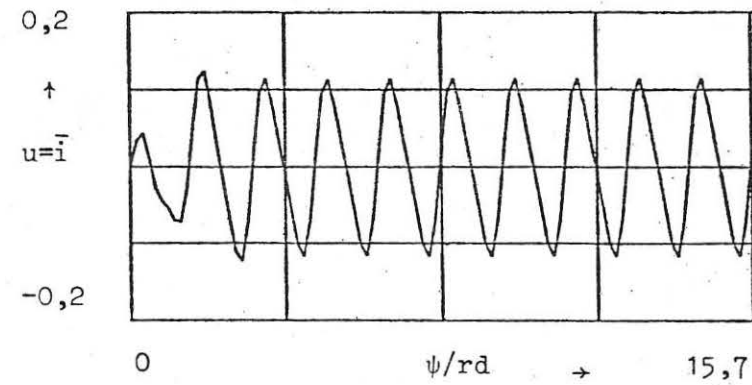


Bild A.4 Steuergröße $u = \bar{i}$

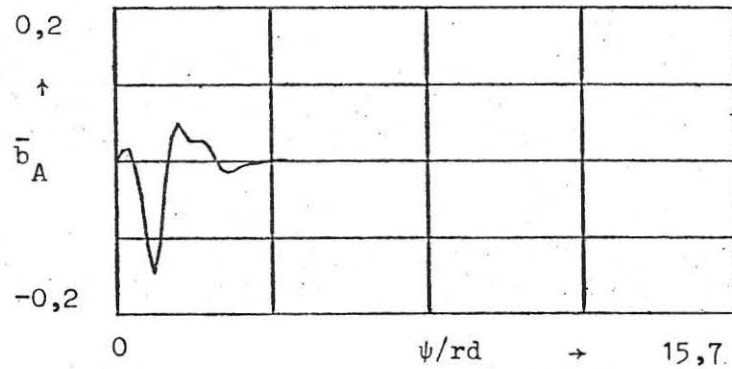


Bild A.3 Aktuatoranschlußbeschleunigung \bar{b}_A

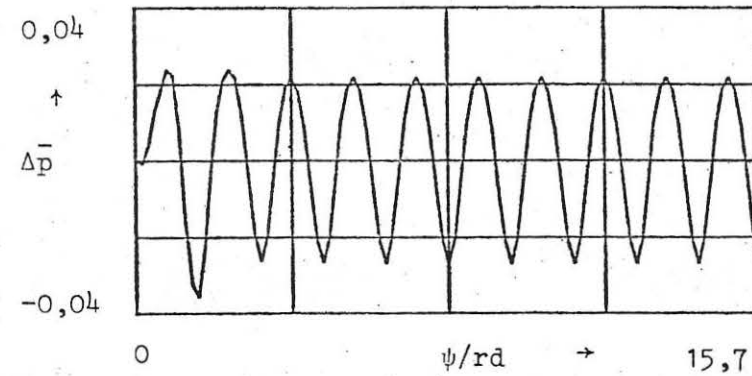


Bild A.5 Aktuatordruckdifferenz $\Delta \bar{p}$

bei Rückführung von Relativauslenkung und Aktuatoranschlußbeschleunigung

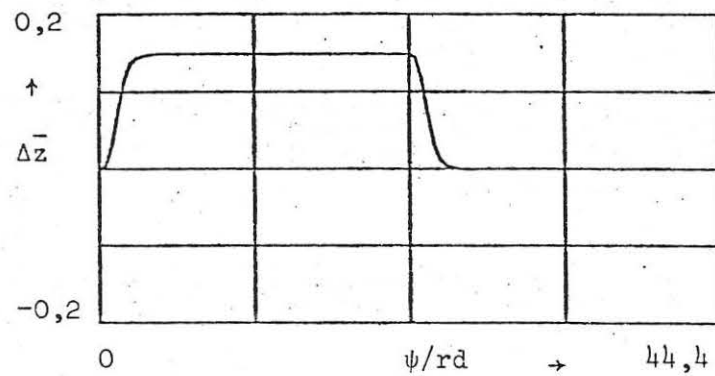


Bild A.6 Relativauslenkung $\Delta \bar{z}$

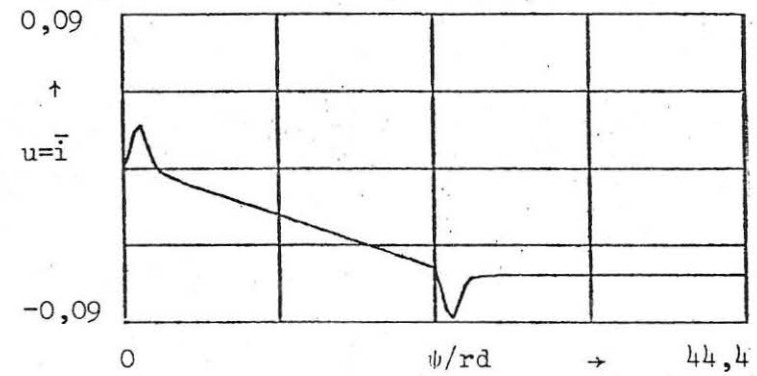


Bild A.8 Steuergröße $u = \bar{i}$

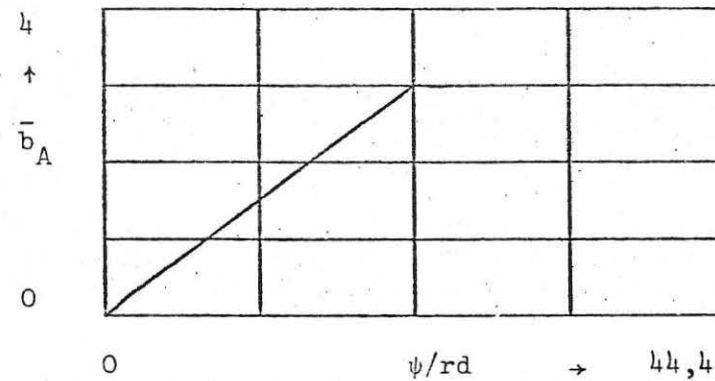


Bild A.7 Aktuatoranschlußbeschleunigung \bar{b}_A

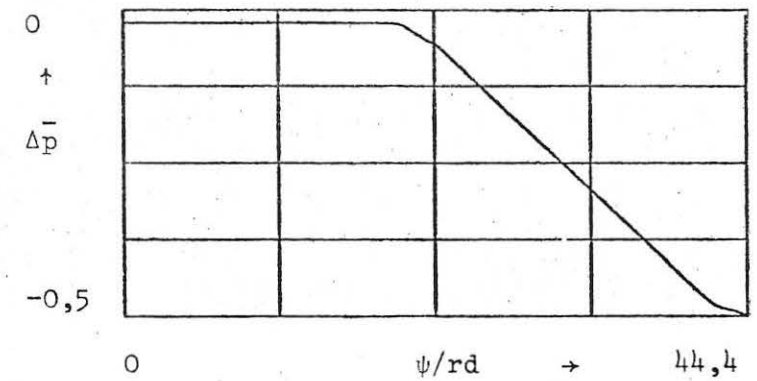


Bild A.9 Aktuatordruckdifferenz $\Delta \bar{p}$

bei Rückführung von Relativauslenkung und Aktuatoranschlußbeschleunigung

Das geschlossene System hat die folgenden Eigenwerte:

Realteile:	- 1,8273	Imaginärteile:	4,7572
	- 8,2266		- 2,6574
	- 1,2181		7,1910
	- 1,2181		- 7,1910
	- 1,2385		2,8327
	- 1,2385		- 2,8327
	- 1,8207		- 4,7572
	- 8,2266		2,6574
	- 1,4276		7,4445
	- 1,4276		- 7,4445

Die Störfrequenzgänge der Ausgänge $\Delta \bar{z}$ und \bar{b}_A sind in den folgenden Bildern dargestellt (Bilder A.10 bis A.11).

In den Störfrequenzgang $|\bar{F}_s^*(j\omega)| = \left| \frac{\bar{b}_A(j\omega)}{\bar{F}_R(j\omega)} \right|$ sind die "Breiten"

der charakteristischen Nullstellen bei 4Ω und 8Ω gut ausgebildet.

Der Dämpfungsgewinn $\beta(\cdot)$ ist z.B. bei

$$\beta(3,63 \Omega) = 13 \text{ dB}$$

$$\beta(4,17 \Omega) = 23 \text{ dB}$$

$$\beta(7,24 \Omega) = 9 \text{ dB}$$

$$\beta(8,32 \Omega) = 23 \text{ dB}$$

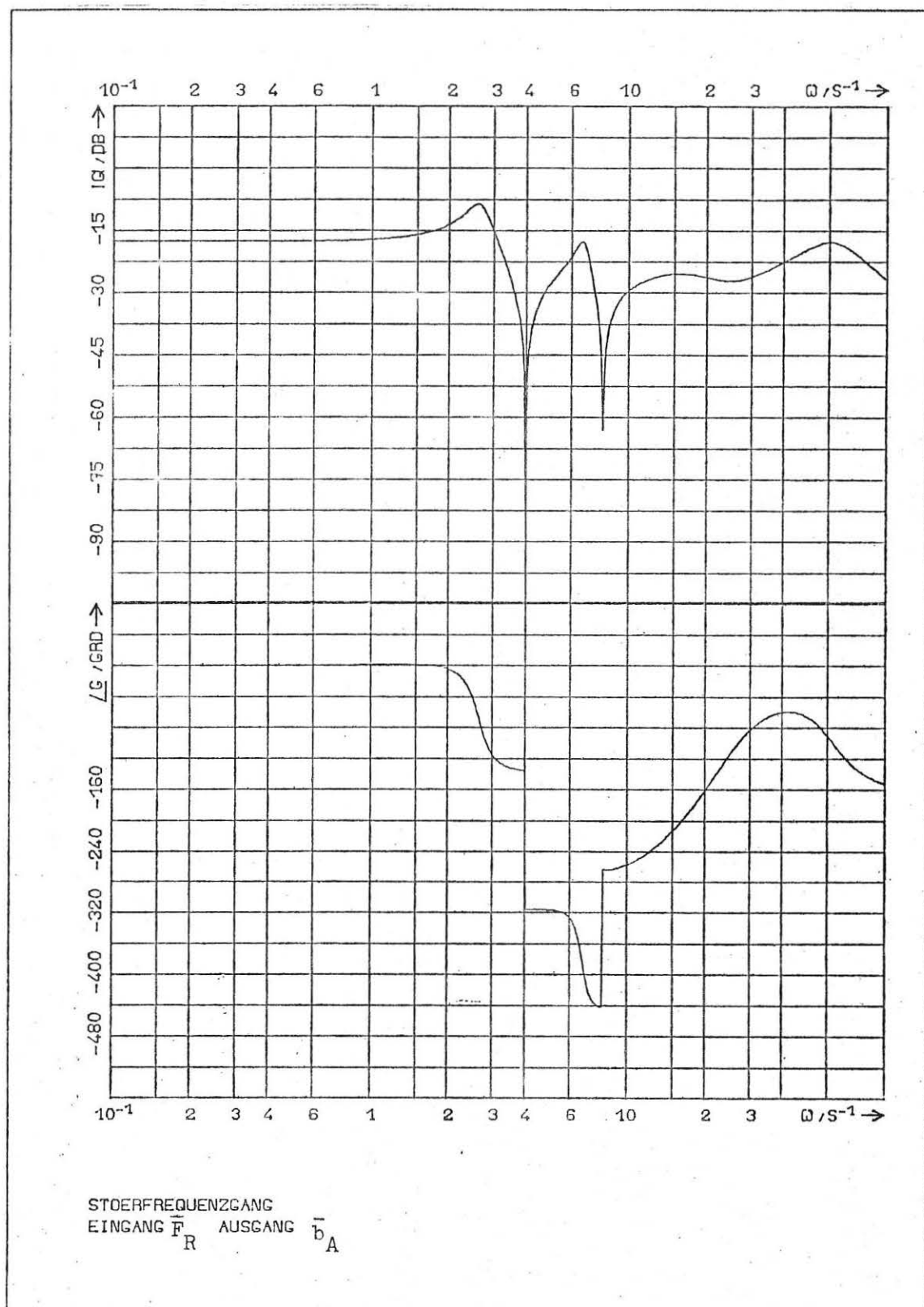


Bild A.10: Störfrequenzgang $\left| \bar{F}_S^*(j\omega) \right| = \left| \frac{\bar{b}_A(j\omega)}{\bar{F}_R(j\omega)} \right|$

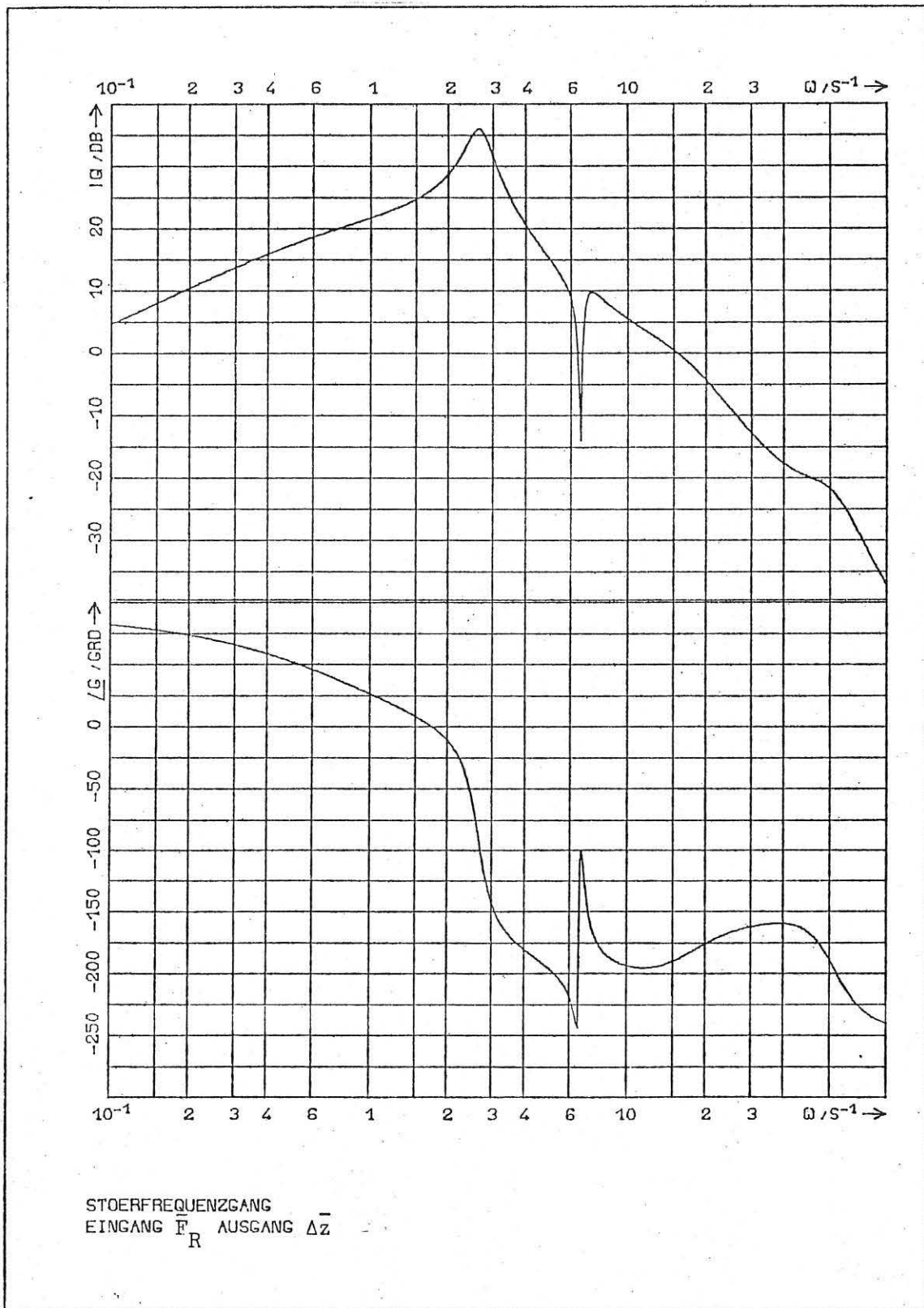


Bild A.12: Störfrequenzgang $\left| \bar{F}_S^*(j\omega) \right| = \left| \frac{\Delta \bar{z}(j\omega)}{\bar{F}_R(j\omega)} \right|$